UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO USP
PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

CARLOS ALBERTO NERES JÚNIOR

Estudo de caso com foco no ajuste de rele de proteção em uma linha de distribuição para atendimento de projeto de um sistema fotovoltaico em geração distribuída

São Paulo
2019

CARLOS ALBERTO NERES JÚNIOR

Estudo de caso com foco no ajuste de rele de proteção em uma linha de distribuição para atendimento de projeto de um sistema fotovoltaico em geração distribuída

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como forma de avaliação do Curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Área de concentração: Energia Solar Fotovoltaica

Orientador: Prof. MSc. Álvaro Nakano

São Paulo

2019

CARLOS ALBERTO NERES JÚNIOR

Estudo de caso com foco no ajuste de rele de proteção em uma linha de distribuição para atendimento de projeto de um sistema fotovoltaico em geração distribuída

Esta monografia foi apresentada e julgada como adequada pelo Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Aprovado em:

_____

Orientador: Prof. MSc. Álvaro Nakano
Universidade de São Paulo

_____

Prof. Dr. José Aquiles Baesso Grimoni
Universidade de São Paulo

_____

Prof. Dr. Claudio Roberto de Freitas Pacheco
Universidade de São Paulo

Dedico esta monografia primeiramente a Deus, ao meu pai, à minha mãe e à minha esposa; meus amigos e familiares; e a grande gama de parceiros profissionais e equipes das quais pude fazer parte.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter vencido mais um degrau na minha vida profissional, hoje o desafio que foi tão sonhado, o curso de especialização de engenharia de geração de energia advinda de fontes renováveis da USP, tão atual assunto em diversos debates;

À minha mãe e meu pai que sempre me ajudaram no decorrer destes anos,

Ao amor da minha vida, minha esposa Suelen que enfrentou comigo os ultimos anos e vencemos juntos nossas batalhas diárias;

Aos colegas de trabalho de maneira geral e também de uma forma especial aos técnicos eletricistas e engenheiros eletricistas,

Ao Sr. Fernando de Almeida Borges, pela paciência e novamente me auxiliar no processo contínuo de aprendizagem

Aos senhores que iniciaram comigo no início do ano de 2018, o desafio que enfrentamos juntos a resolução de muitos projetos, incluindo o projeto e execução da construção da linha de distribuição de energia que é tema deste trabalho,

Ao senhor Tiago Palma de Castro, Luis Carlos Grossi Jr e Felipe Daros Falcão, que ao findar esse desafio restará a lembrança de ter satisfeito todos as situações apresentadas a nós durante esse ano. Meu adeus pode ser um até logo, são profissionais excelentes.

Ao mestre da USP São Paulo/SP e orientador Alvaro Nakano, pelo foco e dedicação naquilo que faz; que reservou parte de seu tempo para a orientação e auxílio na conclusão deste trabalho.

“Pelo nível de insolação que o Brasil tem [...], o Brasil pra mim é fadado a ser um exemplo de uso de energia solar e certamente será!”

(Bruno Topel, 2014)

RESUMO

Esta monografia teve por objetivo desenvolver um estudo de caso de um projeto de usina de energia solar fotovoltaica com foco na proteção de uma linha de distribuição que fora construída para interligar a UFV até a subestação de energia e composta por elementos padronizados de uma rede de distribuição de energia da concessionária local para um caso real. A UFV em questão foi dimensionada para uma potência final de 8MWp, sendo formada por duas centrais geradoras de 4 MWp conectadas em geração distribuída na modalidade consumo remoto. Demonstrou-se o desenvolvimento da parametrização do equipamento de proteção e as propriedades de uma proteção bem ajustada, coordenada e até seletiva, visto pelo lado da concessionária. São apresentadas as funções do dispositivo de proteção e suas características, sincronizando com a proteção existente na linha de transmissão, incluindo os cálculos de curto circuito e o alinhamento das curvas de proteção, com o apoio do software do fabricante. Para atender a conexão da UFV em geração distribuída de energia, fora considerado o estudo da corrente de curto circuito em casos de falhas nas condições normais de carga, bem como a quantidade de consumidores já atendidos pela subestação instalada no local e conectada à rede de transmissão. O estudo deste projeto resultou em uma seletividade e coordenação adequadas, e dessa forma atingiu-se o objetivo final da confiabilidade para a conexão e a operação destas centrais geradoras fotovoltaicas.

Palavras-chave: Geração distribuída. Proteção de sobrecorrente. Curto Circuito. Concessionária de energia elétrica.

ABSTRACT

This monograph aims to develop a case study of a project of power plant of photovoltaic solar energy with a focus on the protection of a distribution line that was built to connect the PV System up to the substation of energy and composed of standardized elements of a distribution network power from the local utility for a real case. The PV System in question was dimensioned for a final output of 8MWp, being formed by two power-generating 4MWp-connected distributed generation in the mode of consumption the remote. It has been demonstrated that the development of the parameterization of the protective equipment and the properties of a protection well-adjusted, coordinated, and even selective, seen by the side of the utility*. Are presented the functions of the protective device and its features, synchronizing with the existing protection in the transmission line, including the study of short circuit and the alignment of the curves of protection, with the support of the software manufacturer. To meet the connection of the UFV in distributed power generation, off considered the study of the short-circuit current in case of failure under conditions of normal load, as well as the amount of consumers are already served by the substation installed on site and connected to the transmission network. The study of this project resulted in a selectivity and appropriate co-ordination, and thus reached the ultimate goal of the reliability for the connection and operation of these power plants photovoltaic.*

Keywords: Distributed Generation. Overcurrent protection. Short-Circuit. Electric utility

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de um diagrama unifilar 18
Figura 2 – Sequência positiva 22
Figura 3 – Sequência negativa 23
Figura 4 – Sequência zero 23
Figura 5 – Representação de um sistema desbalanceado 24
Figura 6 – Componentes simétricas 27
Figura 7 – Componentes de sequência positiva, negativa e zero 28
Figura 8 – Tensões e correntes durante o curto circuito de condição normal e trifásico 31
Figura 9 – Tensões e correntes durante o curto circuito bifásico e monofásico 32
Figura 10 – Fase fase-terra 32
Figura 11 – fase fase-fase 33
Figura 12 – fase fase-terra 33
Figura 13 – falta trifásica sem terra 33
Figura 14 – falta trifásica com terra 34
Figura 15 – Sistema radial 37
Figura 16– Sistema em anel 38
Figura 17 – Sistema de proteção 40
Figura 18 – Diagrama de proteção 41
Figura 19 – Diagrama trifilar do sistema de proteção 41
Figura 20 – Ângulo de máximo torque de um relé direcional 47
Figura 21 – Curvas características normalmente inversa (NI), muito inverta (MI) e extremamente inversa (EI) 49
Figura 22 – Localização Georreferenciada da UFV ITA I e ITA II até a subestação de conexão 52
Figura 23– COORDENOGRAMA Curvas de proteção relé 57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores de assimetria 36
Tabela 2 – Nomenclaturas dos relés de sobrecorrente 48
Tabela 3 – Constantes dos relés de estado sólido e digital 50
Tabela 4 – Memória de cálculo 53
Tabela 5 – Etapa 1: cálculo das correntes nominais (In) 53
Tabela 6 – Etapa 2: Corrente de curto-circuito máxima (ICC fornecida pela concessionária) 54
Tabela 7 – Etapa 3: corrente de magnetização dos transformadores (Im) 54
Tabela 8 – Etapa 4: cálculo do ponto ANSI dos transformadores 54
Tabela 9 – Etapa 5: Funções 50 e 50N 55
Tabela 10 – Etapa 6: Escolha dial de tempo 55
Tabela 11 – Etapa 7: Função 51 (sobrecorrente temporizada de fase) Curva EI 55
Tabela 12 – Etapa 8: Função 51N (sobrecorrente temporizada de Neutro) Curva EI 56
Tabela 13 – Quadro de plotagem no coordenograma 58
Tabela 14 – Relação de Cargas Instaladas 59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de energia elétrica
CEPEL	Centro de pesquisa de energia elétrica
A	Ampére
kV	Quilo volt
MVA	Mega volt ampére
Z	Impedância
TOC	*Time Overcurrent Curve*
TRIP	Sinal de desligamento enviado por um relé.
PU	Por Unidade
UFV	UsinaFotovoltaica
IEC	*Internation Electrotechnical Commission*
ANSI	*American National Standards Institute*

SUMÁRIO

1 **INTRODUÇÃO** 14

2 **OBJETIVO** 16

2.1 OBJETIVO GERAL 16

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 16

3 **METODOLOGIA** 17

4 **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA** 18

4.1 CONCEITOS TÉCNICOS FUNDAMENTAIS E BASES NORMATIVAS 18

4.1.1 **O diagrama unifilar** 18

4.1.2 **Valores base e valores por unidade** 19

4.1.3 **Componentes simétricas** 20

4.1.4 **Operadorα** 26

4.1.5 **Componentes simétricas no sistema trifásico** 28

4.1.5.1 Componentes de sequência positiva 28

4.1.5.2 Componentes de sequência negativa 28

4.1.5.3 Componentes de sequência zero 28

4.1.6 **Correntes de sequência** 29

4.2 CURTO CIRCUITO 30

4.2.1 **Definição** 30

4.2.2 **Características dos curtos circuitos** 32

4.2.3 **Equações de curto circuito** 34

4.2.4 **Comportamento de corrente de curto circuito** 35

4.3 FATORES DE ASSIMETRIA 36

4.4 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO 37

4.5 PROTEÇÃO E SEUS ELEMENTOS 38

4.6 IDEIA BÁSICA DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO 39

4.7 DISJUNTOR 40
4.8 RELÉ 42
4.8.1 **Relé de sobrecorrente** 43
4.8.2 **O relé de sobrecorrente direcional de fase** 43
4.8.3 **Função 50/51 e 50n/51n (proteção de sobrecorrente instantânea e temporizada de fase e neutro)** 44
4.8.4 **Noções de coordenação de relés de sobrecorrente** 44
5 **ESTUDO DE CASO** 46
5.1 FILOSOFIA DE PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO 46
5.2 ÂNGULO DE TORQUE RELÉ DIRECIONAL 47
5.3 AJUSTES PARA PARAMETRIZAÇÃO DOS RELÉS 47
5.4 GRÁFICO TEMPO/CORRENTE DE OPERAÇÃO DO RELÉ 49
6 **RESULTADOS** 51
6.1 MEMÓRIA DE CÁLCULOS E PARÂMETROS PARA AJUSTES DA PROTEÇÃO ELETRÔNICA UFV 13,8KV – URP 6000 – DEMANDA 6630KW 53
7 **CONCLUSÃO** 60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 62
APÊNDICE A – Composição da rede de distribuição UFV ITA sentido Subestação 64
APÊNDICE B – Composição da rede de distribuição UFV ITA sentido Subestação 65
APÊNDICE C – Composição da rede de distribuição UFV ITA faixa de servidão 66
APÊNDICE D – Composição da rede de distribuição UFV ITA sentido Subestação 67
APÊNDICE E – Composição da rede de distribuição UFV ITA sentido Subestação 68

APÊNDICE F – Composição da rede de distribuição UFV ITA sentido Subestação.....69

APÊNDICE G – Diagrama Unifilar UFV ITA I e ITA II parte I.....70

APÊNDICE H – Diagrama Unifilar UFV ITA I e ITA II parte II.....71

APÊNDICE I – Diagrama Unifilar UFV ITA I e ITA II parte III 72

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica e o potencial de produção de energia solar fotovoltaica no Brasil atualmente, após mais de 6 anos da norma regulamentadora para conexões de geradores advindos dessa fonte de energia elétrica, potencializou o interesse pelo assunto conexão e, a procura por financiamentos de projeto e construções para essa fonte de energia. O fator proteção é o foco desse trabalho, levando-se em conta as UFVs que se encontram longe de seu ponto de conexão, com a necessidade de serem construídas redes de distribuição de energia para conectar até a subestação, em geral subestações sobrecarregadas e que precisam de uma maior e mais frequente manutenção, colocando em risco o fornecimento de energia para muitos municípios brasileiros, e esse cuidado deve ser item de projeto para os próprios acessantes do sistema elétrico, uma vez que as subestações já estavam operando há muito tempo antes de qualquer pensamento em energia solar fotovoltaica em geração distribuída.

Como o consumo de energia se estabelece de maneira aleatória com relação aos blocos geradores de energia, e para tal fato deve-se transmitir a energia que é gerada para estes pontos de consumo, estabelecendo suas necessárias interligações de forma a garantir a manutenção de um sistema contínuo e atender a demandas de diferentes localidades as concessionárias de energia elétrica devem se adequar às exigências dos órgãos reguladores com relação à qualidade de energia elétrica, despacho de potência e a confiabilidade que são regulamentadas pela ANEEL.

O sistema elétrico de potência atualmente, depois de muita evolução tecnológica de equipamentos e materiais, teve uma formação de um sistema só e interligado para entre outras vantagens, no caso de uma emergência, ser flexível para atender pontos sem a necessidade de muita reserva de energia. Como os blocos de transmissão de energia se encontram em centenas de quilômetros de rede aérea, a transmissão é muito eficiente, contudo está exposta a condições climáticas adversas e mais intensas como ventos fortes, chuvas torrenciais e fenômenos atmosféricos.

Em um caso de falta, falha do sistema ou de equipamento, deve se interromper o fornecimento de potência para o bloco defeituoso, e esta é a função dos equipamentos de proteção do sistema elétrico; que devem ser instalados nos painéis das subestações de maneira a ler e supervisionar o sistema estando sempre alerta a

anormalidades e mandar comando de abertura dos disjuntores nos tempos determinados nos estudos da topologia da rede, abrindo o circuito defeituoso de maneira a evitar a exposição da potência dos estragos que podem fazer um curto circuito desta magnitude.

Esta monografia teve por objetivo desenvolver um estudo de caso de um projeto de usina de energia solar fotovoltaica com foco na proteção de uma linha de distribuição que fora construída para interligar a UFV até a subestação de energia e composta por elementos padronizados de uma rede de distribuição de energia da concessionária local para um caso real. A UFV em questão foi dimensionada para uma potência final de 8MWp, sendo formada por duas centrais geradoras de 4 MWp conectadas em geração distribuída na modalidade consumo remoto.

Este trabalho contém o planejamento do estudo do curto circuito e simulações de faltas na rede de distribuição, valores de ajustes para o relé e a contribuição de cada parte do sistema para a corrente de curto circuito no momento da falha e com o foco na filosofia de proteção adotada. Esses dados foram coletados e foram inseridos nas curvas de temporização do rele, que enxerga a impedância da linha e monitora desde os estados de condição normal de carga até a falta que desenvolve valores anormais de corrente que gera um desequilíbrio no sistema e gera a assimetria da corrente elétrica.

Desta forma, o estudo contempla o desenvolvimento da parametrização do equipamento de proteção e as propriedades de uma proteção bem ajustada, coordenada e seletiva, visto pelo lado da concessionária, conforme descritos nos capítulos relacionados a Revisão Bibliográfica e Estudo de caso, respectivamente.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve por objetivo desenvolver um estudo de caso de um projeto de central geradora de fotovoltaica com foco na proteção de uma linha de distribuição que fora construída para interligar a UFV até a subestação de energia, visto pelo lado da concessionária.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os conceitos técnicos fundamentais para análise deste trabalho se baseiam na norma IEC padrão internacional para operabilidade de sistemas de energia a longo prazo. A definição e conceitos apresentados no que tange à proteção e seus elementos, tiveram o objetivo e foco em administrar a geração de energia neste local em específico e garantir a operação da linha de distribuição de energia até o destino final.

Os objetivos específicos no desenvolvimento deste trabalho foram:

- Conceitos técnicos fundamentais e bases normativas
- Proteção e seus elementos
- Estudo de caso
- Resultados
- Conclusão

3 METODOLOGIA

- Estudo dos conceitos técnicos fundamentais;
- Estudo dos requisitos das normas técnicas da ABNT;
- Estudo dos conceitos de Curto-Circuito e Fatores de Assimetria;
- Estudos sobre proteção e seus elementos;
- Desenvolvimento do estudo de caso;
- Simulações com apoio de *software* do fabricante do equipamento de proteção.
- Análise crítica dos resultados

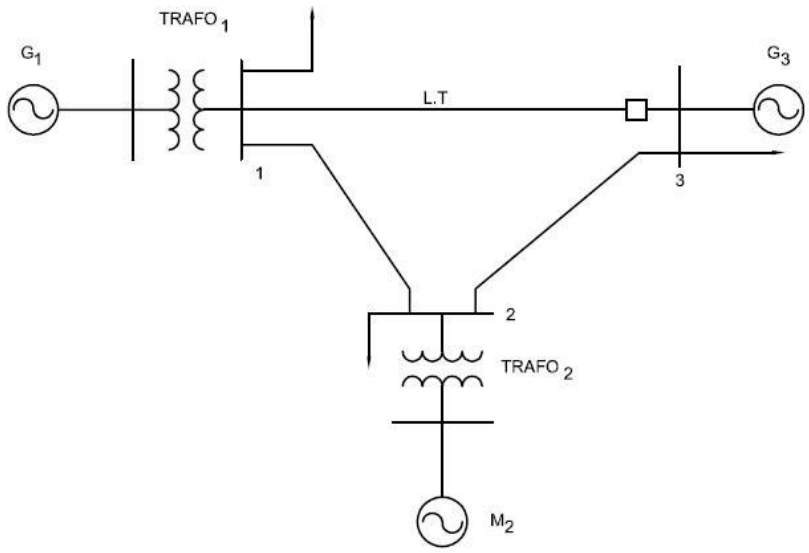
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 CONCEITOS TÉCNICOS FUNDAMENTAIS E BASES NORMATIVAS

4.1.1 O diagrama unifilar

Na engenharia representa-se o sistema elétrico de potência interligado, por meio do diagrama unifilar (geração de energia elétrica, linhas de transmissão e distribuição e barras nas subestações) que é uma representação em formato de símbolos, tanto para planejamento, projeto, operação, manutenção, etc. Este diagrama contempla linhas (cabos condutores), parte do equivalente da geração e também as barras da subestação de transformação de energia; esses símbolos representam cada etapa do processo de transmissão da energia do ponto gerador até o seu consumo ou ponto de entrega. Para o estudo de proteção o diagrama unifilar é essencial, pois para base de cálculo, tem todos valores pontuais da topologia da rede para o estudo e simulações.

Figura 1 – Exemplo de um diagrama unifilar



Fonte: o própprio autor.

O exemplo mostrado na Figura 1 contempla dois pontos de geração, sendo o gerador 1 (G1) e o gerador 3 (G3), que estão interligados por uma linha de transmissão

(LT). Os dois geradores alimentam uma carga, aqui representada por um transformador (TRAFO 2). A composição do diagrama representa a conexão elétrica dos pontos para melhor entendimento do projeto elétrico.

4.1.2 **Valores base e valores por unidade**

A solução de um sistema interconectado com diferentes níveis de tensão implica em uma trabalhosa conversão dos valores de impedância para um único nível de tensão. No entanto, em sistema elétrico de potência se utiliza o sistema por unidade onde as várias grandezas físicas como potência, tensão, corrente, impedâncias são descritas como frações decimais de grandezas base. Desta forma os diferentes níveis de tensão são eliminados e a rede elétrica composta de geradores, transformadores, linha de diferentes níveis de tensão se reduzem a simples impedâncias (AULA 17..., 201-?).

Valor base: o valor por unidade de qualquer grandeza é definido por:

$$Grandeza\ por\ unidade = \frac{Valor\ real}{Valor\ da\ base}[pu] \text{(Eq.1)}$$

Exemplos:

$$Spu = \frac{S}{Sbase} \text{(Eq.2)}$$

$$Ipu = \frac{I}{Ibase} \text{(Eq.3)}$$

$$Zpu = \frac{Z}{Zbase} \text{(Eq.4)}$$

Onde os numeradores (valores reais) são fasores ou grandezas complexas e os denominadores são sempre grandezas reais.

Nesse trabalho foram considerados valores por unidade somente para níveis de impedância mostrando a transformação. Para níveis de ajustes das unidades de corrente e tensão, respectivamente A e kV.

A demanda de atendimento do sistema em questão é de 6,63MVA e a tensão de operação das linhas de transmissão de energia elétrica de 13.8kV.

A configuração em questão é apresentada nos apêndices G, H e I, desde a configuração da rede elétrica da concessionária e a interconexão com a UFV e todos seus componentes, módulos, inversores e a rede de interligação.

Este trabalho não apresenta detalhes dos fabricantes e fornecedores dos equipamentos, pois se limita e dar a visão contextual da proteção, e teve o objetivo de apresentar a proteção da linha de distribuição no contexto atual de expansão de UFVs no Brasil.

Correntes de curto circuito e correntes de atuação do relé estão calculados no capítulo 3.

Os valores dos curtos circuitos (trifásico, bifásico e fase/terra) apresentados neste trabalho foram calculados pela modelagem do software de cálculo de curto circuito do proprietário fabricante do equipamento.

As simulações deste estudo de caso foram feitas a partir de faltas que podem realmente ocorrer na linha de distribuição em questão, e a parametrização do equipamento de proteção assim como suas curvas de tempo, estão demonstradas de maneira a manter o sistema coordenado e seletivo.

4.1.3 **Componentes simétricas**

As correntes de curto circuito em sistemas elétricos causam desbalanceamento, dificultando os cálculos e as simulações da ocorrência. Por ser de grande dificuldade trabalhar com sistemas polifásicos desequilibrados, os matemáticos trabalharam em busca de uma ferramenta analítica que pudesse resolver o problema. Em 1918 o Dr. Charles L. Fortescue propôs o Método das Componentes Simétricas podendo agora assim avaliar os sistemas desbalanceados (KINDERMANN, 1997).

Para o estudo de sistemas de potência polifásicos desequilibrados é utilizado o método de componentes simétricas, também conhecido como Teorema de *Fortescue*.

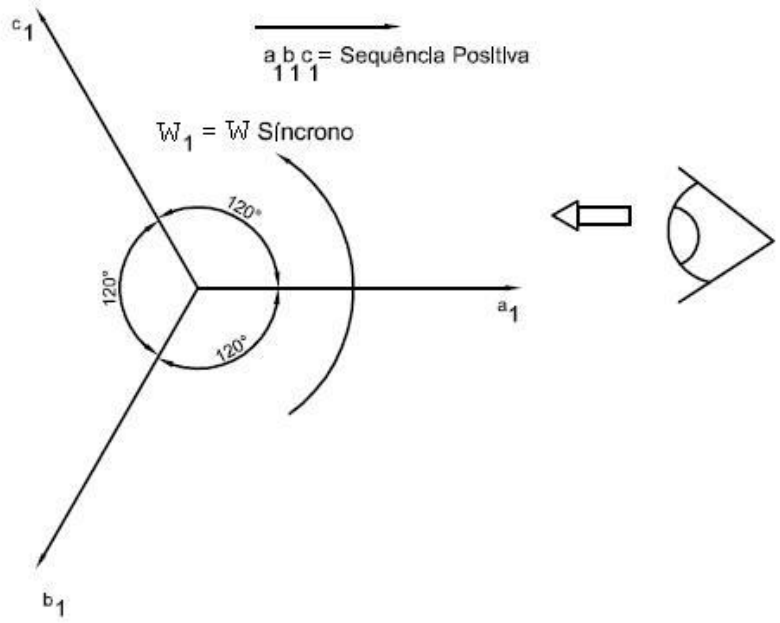
> “Um sistema desequilibrado de n fasores correlacionados pode ser decomposto em n sistemas de fasores equilibrados denominados componentes simétricos dos fasores originais. Os n fasores de cada conjunto de componentes são iguais em módulo e os ângulos entre fasores adjacentes do conjunto são iguais.” (KINDERMANN, 2005).

Sendo assim o Teorema de *Fortescue* consiste na transformação linear de componentes de fase em um novo conjunto de componentes chamadas componentes simétricas.

Para efetuar os cálculos de curto-circuito em um estudo de proteção, o uso de componentes simétricas é extensivamente utilizado.

O estudo publicado por *Fortescue* pode ser resumido pelo seguinte enunciado: Um sistema de n fasores desequilibrados pode ser decomposto em N sistemas de fasores equilibrados, denominadas componentes simétricas dos fasores (KINDERMANN, 1997). Essa sequência de n fasores equilibrados possui o mesmo módulo e são igualmente defasados. Como o sistema elétrico adotado internacionalmente é o trifásico, posteriormente o Teorema de Fortescue foi redefinido para esse tipo de sistema. Segundo Kindermann, um sistema trifásico de três fasores desbalanceados pode ser decomposto em três sistemas trifásicos balanceados chamados de componentes simétricas de sequência positiva, sequência negativa e sequência zero (KINDERMANN, 2005) conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Sequência positiva

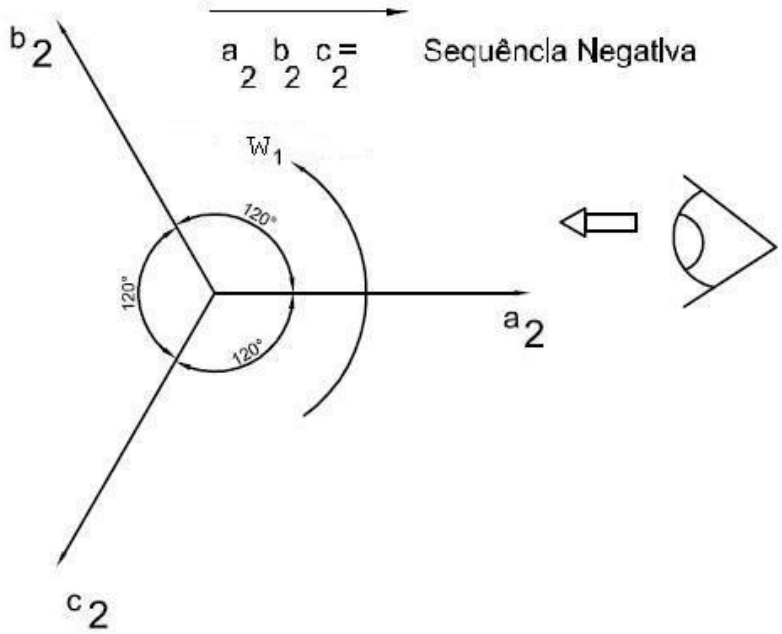


Fonte: Kindermann (2005).

As componentes de sequência positiva são compostas de 3fasores que possuem módulos iguais, defasados em ângulo de 120°, tendo a mesma sequência de fase original do sistema trifásico desbalanceado (ABC). Os fasores da sequência positiva podem representar tanto a corrente como a tensão em condições nominais equilibradas e giram em velocidade síncrona, conforme diagrama fasorial mostrado na Figura 2 (KINDERMANN, 2005).

A componente negativa representa o elemento de tensão ou corrente com sentido de giro inverso, como um observador representado na Figura 3, com a grandeza que mede a rapidez com que é feito um percurso em sentido circular. Ela é representada pela letra grega ômega minúscula.

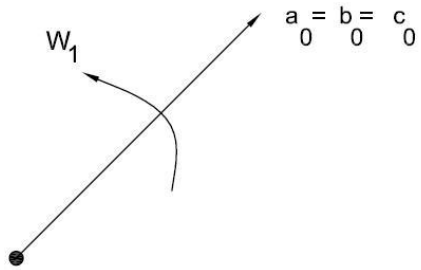
Figura 3 – Sequência negativa



Fonte:Kindermann (2005).

As componentes de sequência zero são compostas de 3fasores que possuem módulos iguais, defasados em ângulo de 0°, tendo a mesma sequência de fase original do sistema trifásico desbalanceado (ABC). Os fasores da sequência zero podem representar tanto a corrente como a tensão em condições nominais equilibradas e giram em velocidade igual à da sequência positiva, conforme diagrama fasorial mostrado na Figura 4:

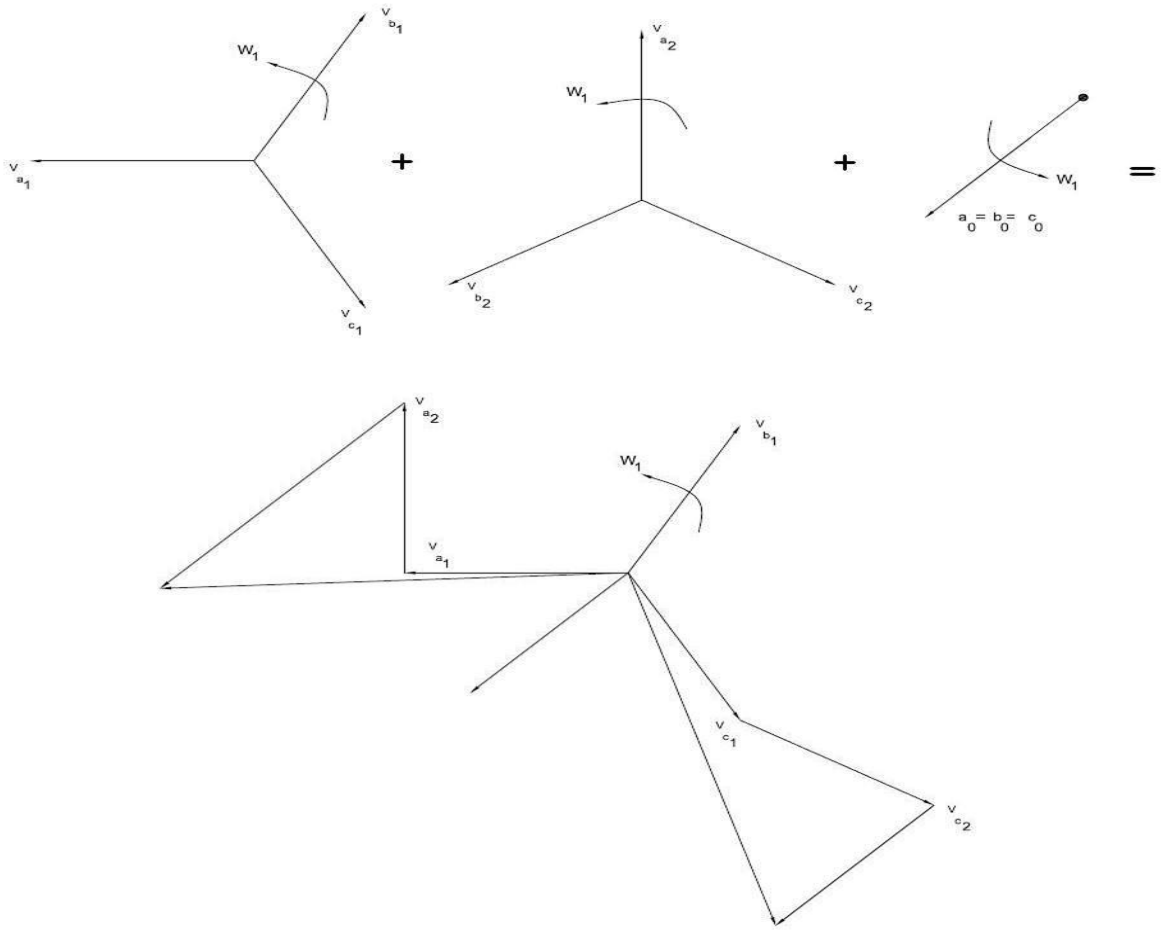
Figura 4 – Sequência zero



Fonte: Kindermann (2005).

Agora podemos mostrar o Teorema de Fortescue em representação analítica. A transformação das componentes de fase para componentes simétricas pode ser vista pela Figura 5.

Figura 5 – Representação de um sistema desbalanceado



Fonte: Kindermann (2005).

Fazendo a superposição dos três sistemas o real sistema desbalanceado original. A expressão analítica para isso é:

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \text{(Eq.5)}$$

$$V_b = V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} \text{(Eq.6)}$$

$$V_c = V_{c0} + V_{c1} + V_{c2} \text{(Eq.7)}$$

Reescrevendo as equações 5, 6 e 7 em função da fase Va:

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \text{(Eq.8)}$$

$$V_b = V_{b0} + a^2 V_{b1} + a V_{b2} \text{(Eq.9)}$$

$$V_c = V_{c0} + a V_{c1} + a^2 V_{c2} \text{(Eq.10)}$$

O operador fasorial “a” é conhecido como operador rotacional, na qual possui módulo um e ângulo 120° (KINDERMANN, 1997).

Geralmente as equações (08), (09) e (10) são escritas na forma matricial. As componentes de sequência das tensões podem ser vistas abaixo na forma matricial pela Equação 11.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} X \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \text{(Eq.11)}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \text{(Eq.12)}$$

Para se obter os fasores componentes de sequência, em função do sistema desbalanceado devemos determinar o inverso do indicado na Equação 11. Isto pode ser visto na Equação 13:

$$\begin{vmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \text{X} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{vmatrix} \text{X} \begin{vmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{vmatrix} \text{(Eq.13)}$$

Agora as componentes de sequência das correntes na forma matricial:

$$\begin{vmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{vmatrix} \text{X} \begin{vmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{vmatrix} \text{(Eq.14)}$$

Fazendo o mesmo que foi feito para a tensão encontram-se as componentes de sequência.

$$\begin{vmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \text{X} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{vmatrix} \text{X} \begin{vmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{vmatrix} \text{(Eq.15)}$$

Vale salientar que se os elementos que compõem o sistema de potência forem modelados em componentes simétricas, os estudos de curto circuito podem ser efetuados (VIANA FILHO, 2010).

4.1.4 **Operadorα**

Define-se o operador alfa como um número complexo com módulo unitário e argumento 120º, e desse modo, quando aplicado a um fasor qualquer, transforma-o em outro de mesmo módulo e adiantado 120 º, definimos os fasores unitários:

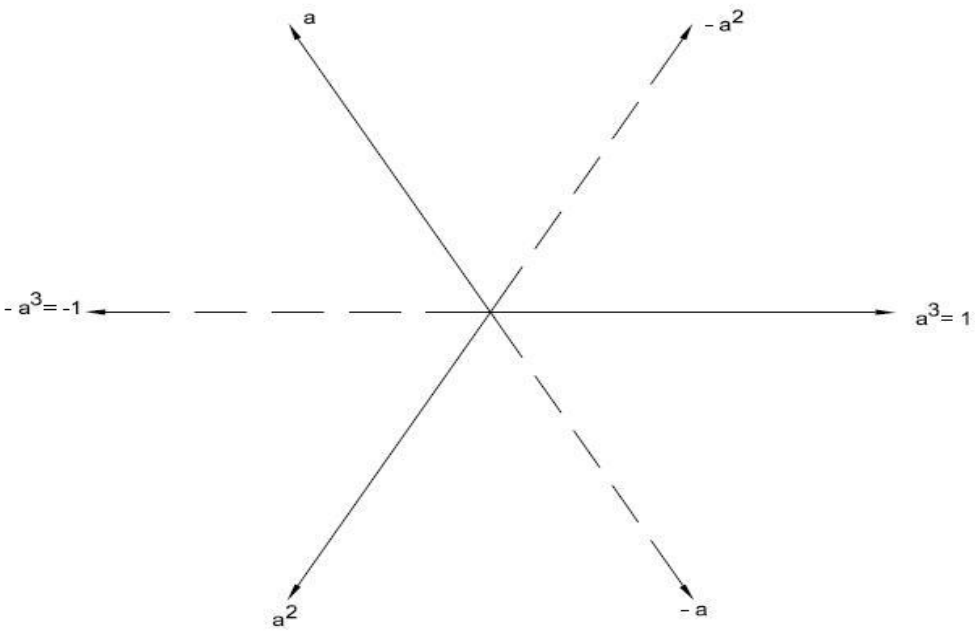
$$a = 1\angle 120° \text{(Eq.16)}$$

$$a^2 = 1\angle -120° \text{(Eq.17)}$$

$$a^3 = 1\angle 0° \text{(Eq.18)}$$

Temos:

Figura 6 – Componentes simétricas



Fonte: Lopes (2007).

Complementando o sistema de análise vetorial, representando acima pelo operador alfa, de suma importância para a análise de desbalanceamento do sistema de potência.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{a1} & V_{a2} & V_{a0} \\ V_{b1} & V_{b2} & V_{b0} \\ V_{c1} & V_{c2} & V_{c0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 & V_2 & V_0 \\ a^2V_1 & aV_2 & V_0 \\ aV_1 & a^2V_2 & V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \text{(Eq.19)}$$

Aplicação na forma de matriz, para as componentes de sequência das tensões na forma matricial;

Invertendo a matriz, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_a & V_b & V_c \\ V_a & aV_b & a^2V_c \\ V_a & a^2V_b & aV_c \end{bmatrix} \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \text{(Eq.20)}$$

Os estudos de curto circuito podem ser efetuados pela modelagem em componentes simétricas, e os elementos que compõem o sistema de potência.

4.1.5 **Componentes simétricas no sistema trifásico**

Um sistema trifásico possui três componentes: positiva, negativa e zero.

4.1.5.1 Componentes de sequência positiva

Consiste em três fasores de igual magnitude e defasados de 120º com a mesma sequência de fases do sistema original, sendo assim possui condições normais equilibradas.

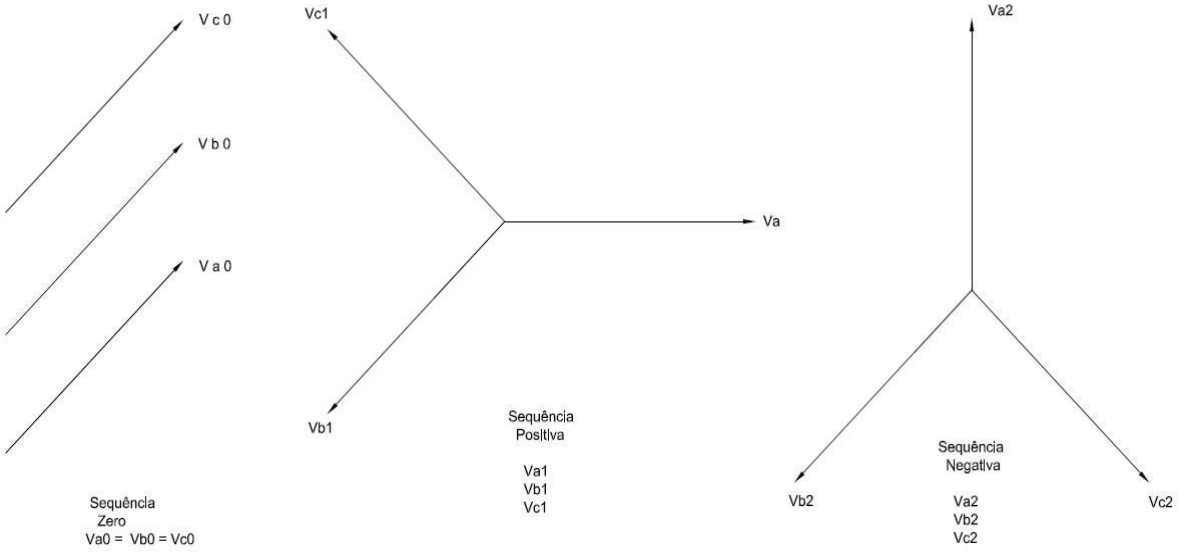
4.1.5.2 Componentes de sequência negativa

Consiste em três fasores de igual magnitude e defasados de 120º e em sequência de fases contrária, ao do sistema original.

4.1.5.3 Componentes de sequência zero

Consiste em três fasores de igual magnitude e fase angular, como apresentado a seguir:

Figura 7 – Componentes de sequência positiva, negativa e zero



Fonte: Lopes (2007).

Conforme apresentado na Figura 7, um sistema desequilibrado de “n” fasores correlacionados pode ser decomposto em “n” sistemas equilibrados denominados componentes simétricos (ou simétricas) dos fasores originais; sendo que os “n” fasores de cada conjunto de componentes são iguais em comprimento, e os ângulos entre os fasores adjacentes do conjunto são iguais, tornando-se uma das mais poderosas ferramentas para análise de redes polifásicas desequilibradas.

4.1.6 **Correntes de sequência**

As equações das Figuras 21, 22, 23, 24, 25 e 26 apresentam a equação dos fasores das fases a,b e c decompostas em sequência zero, sequencia positiva e negativa.

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 \text{(Eq.21)}$$

$$I_b = I_0 + a^2 I_1 + a I_2 \text{(Eq.22)}$$

$$I_c = I_0 + a I_1 + a^2 I_2 \text{(Eq.23)}$$

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \text{(Eq.24)}$$

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_a + a I_b + a^2 I_c) \text{(Eq.25)}$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c) \text{(Eq.26)}$$

Com base nisso, observa-se que:

- Em sistemas trifásicos em Y não aterrado ou em delta não existirá corrente de sequência zero nas linhas;
- Em um sistema equilibrado não existe componentes simétricas de sequência zero e negativa.

- Em sistemas equilibrados a tensão de sequência zera é nula;
- Em sistemas trifásicos em Y com o neutro aterrado a corrente de neutro vale o triplo da corrente de sequência zero (LOPES, 2007).

4.2 CURTO CIRCUITO

4.2.1 **Definição**

O curto-circuito consiste na passagem de corrente elétrica que exceda a normal, em uma linha de circuito, que devido alguma falha no sistema, tem-se sua impedância reduzida a um valor praticamente nulo. Com essa elevada corrente surgem esforços mecânicos e térmicos nos condutores provocando o aumento do risco de falhas nos equipamentos que compõem o sistema como transformador, geradores, motores, componentes não lineares.

Duas propriedades básicas da eletricidade devem ser lembradas: primeiro a corrente sempre tem que percorrer um caminho fechado; e, segundo a corrente elétrica percorre o trajeto que oferece menor resistência ao seu fluxo. Portanto, a corrente de curto-circuito percorrendo terminais que não tenha oposição ao seu fluxo trará consequências drásticas ao sistema elétrico que estiver em falha. Sendo assim, essas correntes devem ser previstas desde o projeto inicial, procurando conhecer suas intensidades em variados pontos do sistema.

Esses cálculos das correntes de curto-circuito em determinados pontos das redes têm enorme importância no planejamento do projeto, pois irá permitir o projetista antever as consequências dos defeitos. Esse conhecimento possibilita a tomada das medidas necessárias para minimizar seus efeitos, com a mínima perturbação do sistema. Isto servirá para garantir que os componentes da rede percorridos pelas correntes de defeitos possam suportar sua ação enquanto elas persistirem, assim como também se pode realizar o dimensionamento dos dispositivos que interrompam os circuitos defeituosos, determinando assim o poder de corte de disjuntores, fusíveis e relés (VIANA FILHO, 2010).

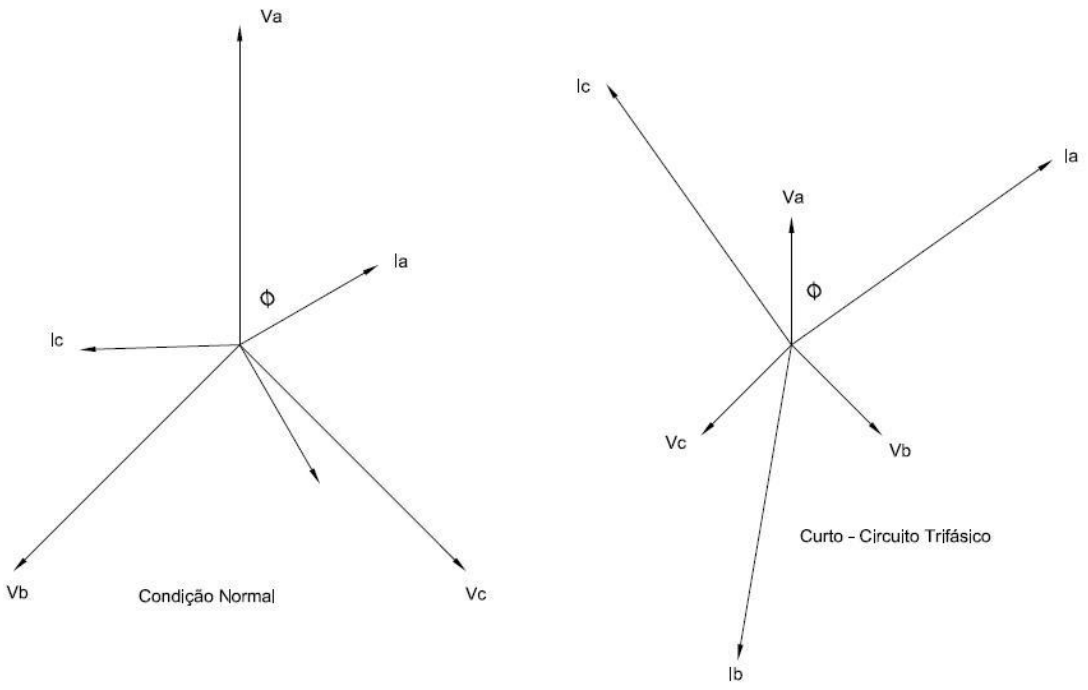
Um sistema elétrico está constantemente sujeito a ocorrências que causam distúrbios no seu estado normal. Estas perturbações alteram as grandezas elétricas (corrente, tensão, frequência), muitas vezes provocando violações nas restrições

operativas. Nestes casos são necessárias ações preventivas e/ou corretivas para sanar ou limitar as consequências desses distúrbios.

As perturbações mais comuns e também as mais severas são os curtos-circuitos, que ocorrem em decorrência da ruptura da isolação entre as fases ou entre a fase e terra (FREITAS et al., 2012).

A magnitude da corrente de curto-circuito depende de vários fatores, tais como: tipo de curto-circuito, capacidade do sistema de geração, topologia da rede elétrica, tipo de aterramento do neutro dos equipamentos, etc. (STEVENSON, 1986).

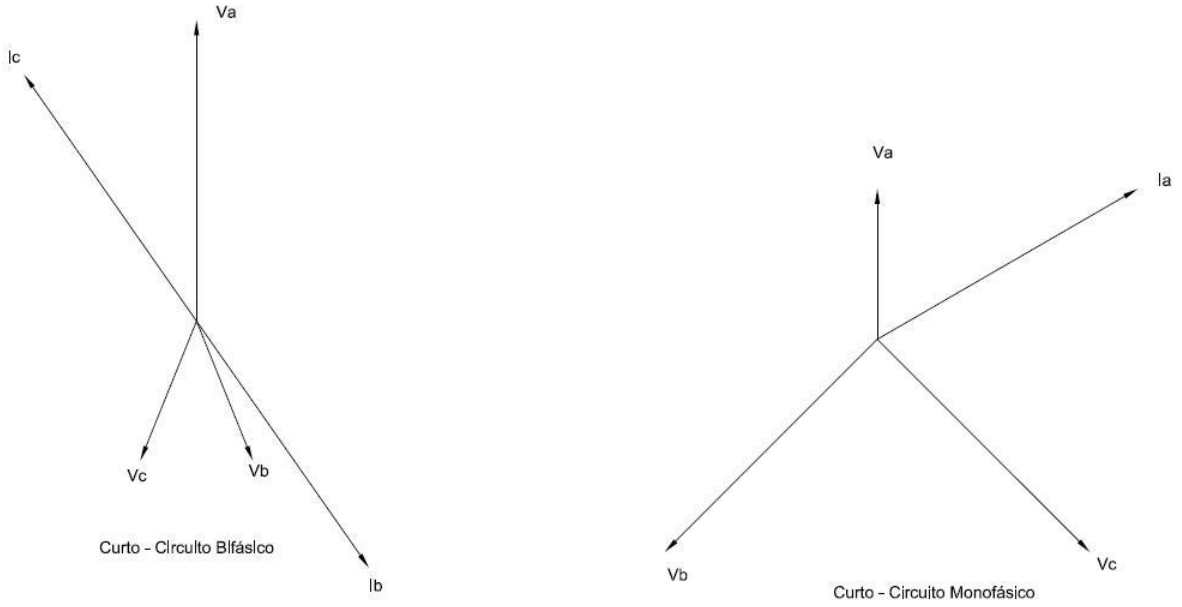
Figura 8 – Tensões e correntes durante o curto circuito de condição normal e trifásico



Fonte: próprio autor.

Pode-se observar, conforme apresentado na Figura 8, o que ocorre na condição de curto-circuito e dessa forma coordenar um equipamento de proteção inteligente para analisar a condição fora de operação normal e tomar a ação corretiva.

Figura 9 – Tensões e correntes durante o curto circuito bifásico e monofásico

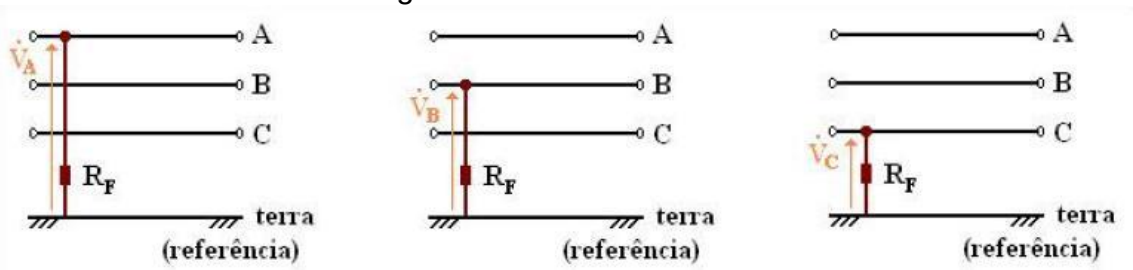


Fonte: próprio autor.

A evidência da Figura 9 apresenta a representação do dimensional de uma falha com curto-circuito nos sistemas de circuito bifásico e monofásico, e a atenção para o nível exacerbado do fasor da corrente elétrica, que em pouco tempo destoa da condição normal.

4.2.2 **Características dos curtos circuitos**

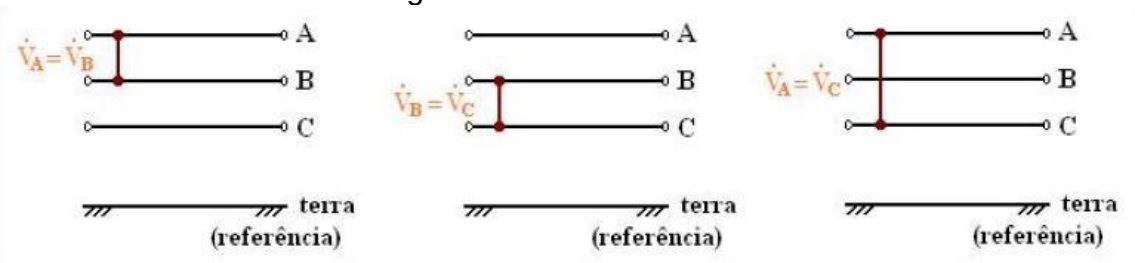
Figura 10 – Fase fase-terra



Fonte: próprio autor.

A Figura 10 representa um circuito trifásico e a componente de referência zero para a tensão das fases A, B e C. A referência Rf (resistência de falta) gera a tensão equivalente por fase.

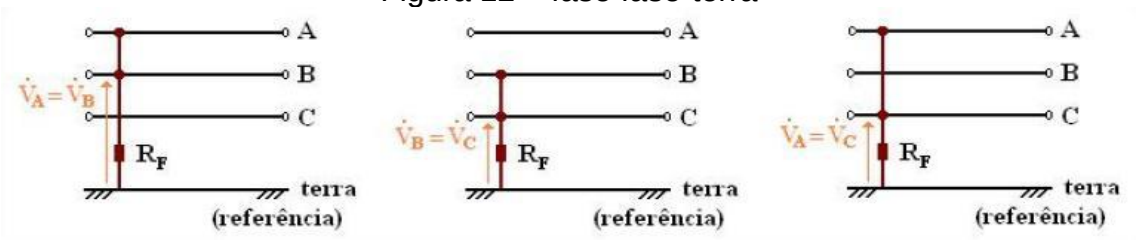
Figura 11 – fase fase-fase



Fonte: próprio autor.

Sinergia entre as fases de uma rede elétrica com a comparação de tensão elétrica no sistema trifásico, apresentado na Figura 11.

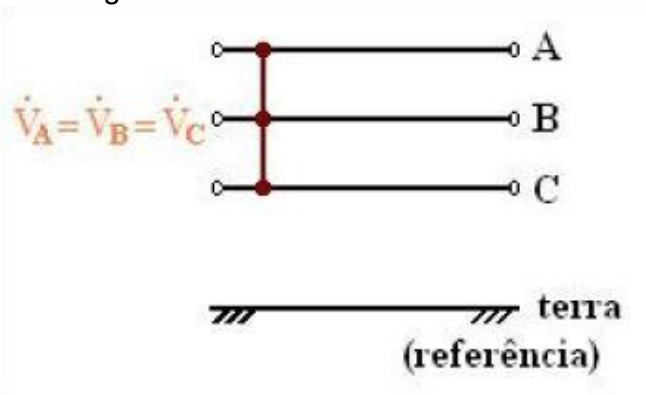
Figura 12 – fase fase-terra



Fonte: próprio autor.

Na Figura 12 é evidenciada a comparação entre as fases do sistema trifásico, adicionando a referência terra ao sistema.

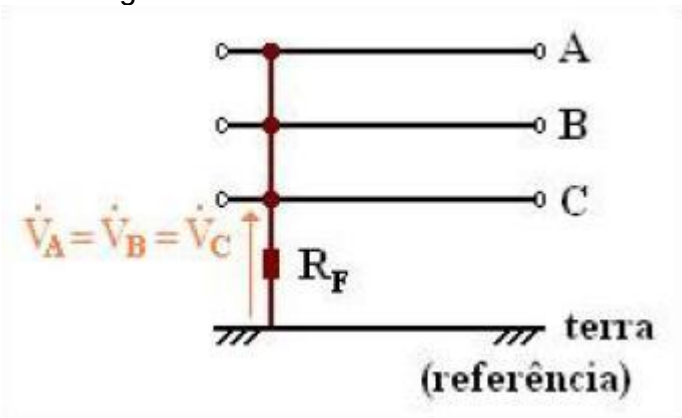
Figura 13 – falta trifásica sem terra



Fonte: próprio autor.

O comportamento da tensão elétrica na condição de falta é representado na Figura 13, porém sem a referência da terra.

Figura 14 – falta trifásica com terra



Fonte: próprio autor.

Na Figura 14, numa condição de falta trifásica inserindo a referência terra, considerando o valor de RF (resistência da falta ou resistência de arco) que, na prática, nunca é nulo.

4.2.3 **Equações de curto circuito**

$$\boldsymbol{Icc3ø} = \frac{\boldsymbol{V}}{|\boldsymbol{Z}|} \text{(Eq.27)}$$

$$\boldsymbol{Icc2ø} = \frac{\sqrt{\boldsymbol{3}}.\boldsymbol{Icc3ø}}{\boldsymbol{2}} \text{(Eq.28)}$$

$$\boldsymbol{Icc1ø} = \frac{\boldsymbol{3V}}{|\boldsymbol{2.Z1+Z0}|} \text{(Eq.29)}$$

Em que:

- Icc3Ø é a corrente de curto-circuito trifásica simétrica;
- Icc2Ø é a corrente de curto-circuito bifásica simétrica;
- Icc1Ø é a corrente de curto-circuito monofásica simétrica;
- V é o valor de tensão de Fase-Terra;
- Z1 é a impedância de sequência positiva;
- Z0 é a impedância de sequência zero.

4.2.4 **Comportamento de corrente de curto circuito**

No domínio do tempo a corrente de um curto-circuito, pode ser dividida em duas partes:

- Transitória (assimétrica);
- Regime (simétrica).

Durante o período transitório, após o instante que ocorreu o curto circuito, em torno de 0,1s (6 ciclos de 60Hz), essa corrente é assimétrica, conhecida como corrente dinâmica. Passado este período, a corrente entra em regime permanente, tornando-se simétrica. Devido a estas características, é comum representá-la pela Equação 30.

$$I_{CURTO} = I_M coswt + I_0 e^{\frac{-t}{\delta}} \text{(Eq.30)}$$

Em que I_M: Valor máximo da componente simétrica, que permanece no circuito até a extinção do curto-circuito (componente em regime).

I_0: Componente que cai exponencialmente de acordo com a constante de tempo circuito δ, que é função dos parâmetros do mesmo:

$$\delta = \frac{x}{R} \text{(Eq.31)}$$

Os parâmetros X e R, dependem do local da falta e das componentes de sequências positiva, negativa e zero das impedâncias envolvidas no curto-circuito.

Na Equação30, quando a componente exponencial tende a zero, a corrente de curto-circuito entra em regime. Para cada tipo de curto-circuito, o valor eficaz desta componente em regime é calculado através da teoria de componentes simétricas (circuitos de sequências).O valor da componente dinâmica (assimétrica), na prática, é determinado multiplicando-se o valor eficaz da componente em regime pelo fator de assimetria (fa) calculado ou estimado no ponto da falta (SANTOS, 2009).

$$I_{CURTO,ASSIMÉTRICA} = f_a . I_{CURTO,REGIME} \text{(Eq.32)}$$

4.3 FATORES DE ASSIMETRIA

Os valores dos fatores de assimetria calculados para as correntes de curtos-circuitos, em sistemas elétricos de potência, variam com o tempo e com a constante de circuito δ. É comum serem tabelados ou dados através de curvas características. A Tabela 1 apresenta os fatores de assimetria em função da relação X/R, para um tempo de meio ciclo de 60Hz (8,3ms).

Tabela 1 – Fatores de assimetria

X/R	f_a	**X/R**	f_a	**X/R**	f_a
Até 0,25	1	2,3	1,085	6,8	1,36
0,3	1,004	2,4	1,09	7	1,362
0,4	1,005	2,5	1,104	7,25	1,372
0,5	1,006	2,6	1,11	7,5	1,385
0,55	1,077	2,7	1,115	7,75	1,391
0,6	1,008	2,8	1,123	8	1,405
0,65	1,009	2,9	1,13	8,25	1,41
0,7	1,01	3	1,14	8,5	1,42
0,75	1,011	3,1	1,142	8,75	1,425
0,8	1,012	3,2	1,15	9	1,435
0,85	1,013	3,3	1,155	9,25	1,44
0,9	1,015	3,4	1,162	9,5	1,45
0,95	1,018	3,5	1,17	9,75	1,455
1	1,02	3,6	1,175	10	1,465
1,05	1,023	3,7	1,182	11	1,48
1,1	1,025	3,8	1,19	12	1,5
1,15	1,026	3,9	1,192	13	1,515
1,2	1,028	4	1,21	14	1,525
1,25	1,029	4,1	1,212	15	1,55
1,3	1,03	4,2	1,22	16	1,56
1,35	1,033	4,3	1,225	17	1,57
1,4	1,035	4,4	1,23	18	1,58
1,45	1,037	4,5	1,235	19	1,59
1,5	1,04	4,6	1,249	20	1,6
1,55	1,043	4,7	1,255	22,5	1,61
1,6	1,045	4,8	1,26	25	1,615
1,65	1,047	4,9	1,264	27,75	1,625
1,7	1,05	5	1,27	30	1,63
1,75	1,055	5,2	1,275	35	1,636
1,8	1,06	5,4	1,29	40	1,648
1,85	1,063	5,6	1,303	45	1,653
1,9	1,065	5,8	1,31	50	1,659
1,95	1,068	6	1,315	55	1,66
2	1,07	6,2	1,324	60	1,68
2,1	1,075	6,4	1,335	¾	¾
2,2	1,08	6,6	1,35	¾	¾

Fonte: Almeida (2000).

Os valores assimétricos das correntes de curtos-circuitos são empregados para determinação da capacidade de ruptura ou de interrupção dos dispositivos de proteção (chaves-fusíveis, disjuntores; religadores, etc.). Já os valores simétricos, são usados no estudo de seletividade e coordenação de equipamentos de proteção.

De modo geral, em um sistema elétrico, as sobrecorrentes são originadas por sobrecargas e curtos-circuitos.

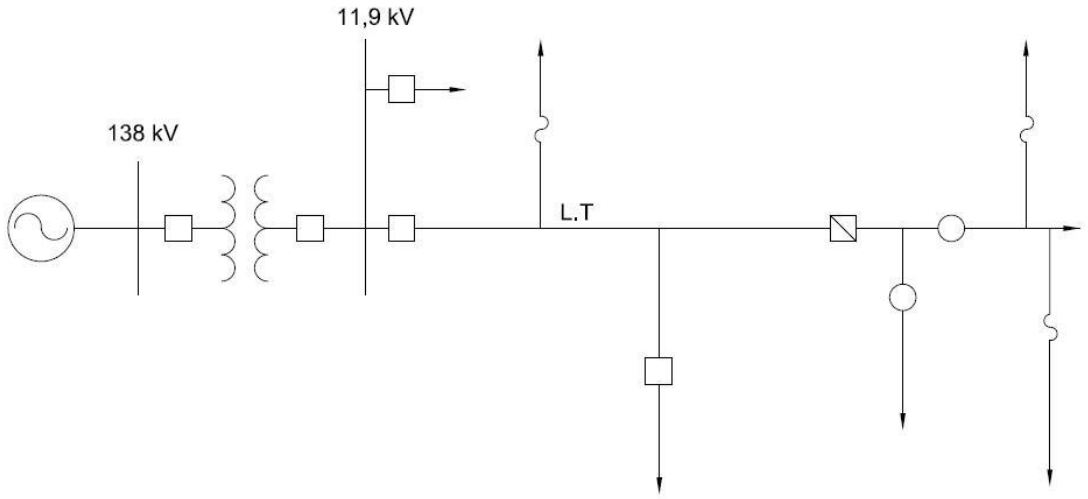
Neste último caso, podem atingir valores elevados, causando danos consideráveis ao sistema.Portanto, é fundamental o estudo quantitativo e qualitativo dos diversos tipos de curtos-circuitos para o desenvolvimento de um sistema de proteção adequado.

4.4 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO

A maneira como os componentes elétricos estão interconectados e o layout da rede elétrica tem uma influência muito grande nos sistemas de proteção.

Um sistema radial, como mostra a Figura 15 de um arranjo que possui uma única fonte alimentando múltiplas cargas e é geralmente associada a um sistema de distribuição.

Figura 15 – Sistema radial

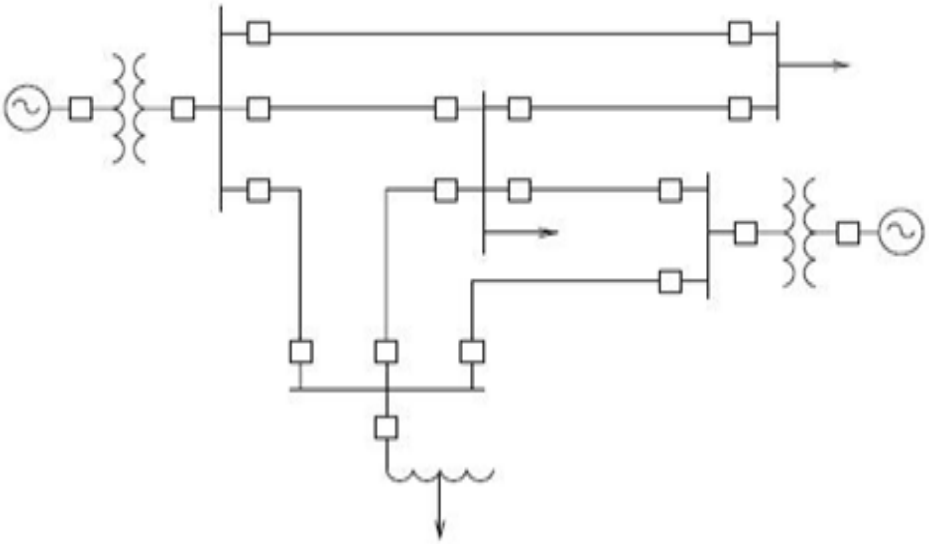


Fonte: Sato (2015).

A construção de tal sistema de relativamente econômico, mas do ponto de vista da confiabilidade deixa muito a desejar, pois a perda da fonte acarreta a falta de energia elétrica para todos os consumidores. Do ponto de vista do sistema de proteção, um sistema radial apresenta uma complexidade menor, pois a corrente de curto-circuito flui sempre no mesmo sentido, isto é, da fonte para o local da falta.

Desde que nos sistemas radiais, os geradores estão eletricamente distantes, as correntes de curtos-circuitos não variam muito com as mudanças nas capacidades geradoras.

Figura 16– Sistema em anel



Fonte: Sato (2015).

A direção dos fluxos das correntes de curtos-circuitos é imprevisível. Além disso, as magnitudes dessas correntes variam numa faixa muito grande com a mudança na configuração do sistema e da capacidade de geração no momento da falta. (SATO, 2015).

4.5 PROTEÇÃO E SEUS ELEMENTOS

Para entender a função do sistema de relés de proteção, deve-se estar familiarizado com a natureza e modos de operação de um sistema elétrico de potência. A energia elétrica é um dos recursos fundamentais da sociedade moderna

que está disponível a qualquer momento, na tensão e frequência corretas e na quantidade exata que o consumidor necessita.

Este desempenho notável de alcançado através de planejamento, projeto, construção e operação cuidadosa de uma complexa rede elétrica composta por geradores, transformadores, linhas de transmissão e de distribuição e outros equipamentos auxiliares. Para um consumidor, o sistema elétrico parece comportar-se sempre em estado permanente: imperturbável, constante e capacidade inesgotável. Entretanto, o sistema de potência está sujeito a constantes distúrbios criados pelas variações aleatórias das cargas, pelas faltas oriundas de causas naturais, e em alguns casos como resultados de falhas de equipamentos ou humanas. Apesar destas constantes perturbações o sistema elétrico se mantém num estado quase permanente graças a dois fatores básicos: o tamanho das cargas ou geradores individuais é muito pequena em relação ao tamanho do sistema e a ação rápida e correta dos equipamentos de proteção quando das ocorrências de perturbações.

Um sistema de proteção detecta uma condição anormal de um sistema de potência e inicia uma ação corretiva tão rapidamente quanto possível para que o sistema de potência não seja levado para fora do seu estado normal. A rapidez de resposta é um elemento essencial de um sistema de proteção - tempo da ordem de uns poucos milissegundos são requeridos frequentemente. A atuação de um sistema de proteção deve ser automática, rápida e restringir ao mínimo a região afetada. Em geral, relé de proteção não evita danos nos equipamentos: ele opera após a ocorrência de algum tipo de distúrbio que já pode ter provocado algum dano. As suas funções, portanto, são: limitar os danos, minimizar o perigo às pessoas, reduzir o stress em outros equipamentos e, acima de tudo, manter a integridade e estabilidade do restante do sistema elétrico, facilitando o restabelecimento.

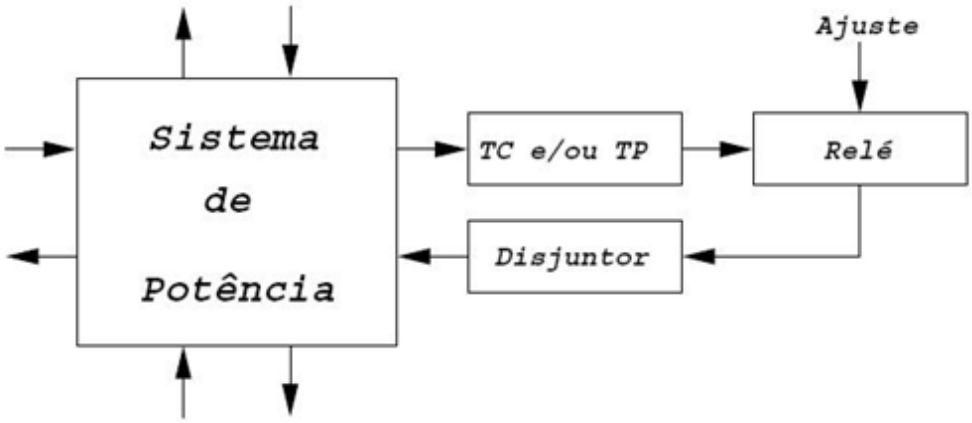
4.6 IDEIA BÁSICA DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO

Os componentes elétricos de um sistema de potência devem ser protegidos contra os curtos-circuitos ou condições anormais de operação, geralmente provocadas pelos próprios curtos-circuitos. Na ocorrência desses eventos é necessário que a parte atingida seja isolada rapidamente do restante da rede elétrica para evitar danos materiais e restringir a sua repercussão no sistema. Esta função é

desempenhada pelo sistema de proteção, cuja ideia básica é apresentada na Figura 12.

As condições do sistema de potência são monitoradas constantemente pelo sistema de medidas analógicas (transformadores de instrumento), que são os transformadores de corrente (TCs) e transformadores de potencial (TPs). As correntes e as tensões transformadas em grandezas secundárias alimentam um sistema de decisões lógicas (relé de proteção), que compara o valor medido com o valor previamente ajustado no relé. A operação do relé ocorrerá sempre que valor medido exceder o valor ajustado, atuando sobre um disjuntor. Os equipamentos que compõem um sistema de proteção são mostrados a seguir (LOPES, 2007).

Figura 17 – Sistema de proteção



Fonte: Lopes (2007).

Os transformadores de instrumento são os redutores de medidas de corrente (TC) e de tensão (TP), que tem a função de isolar os circuitos dos relés da alta tensão, além de padronizar os valores secundários (LOPES, 2007).

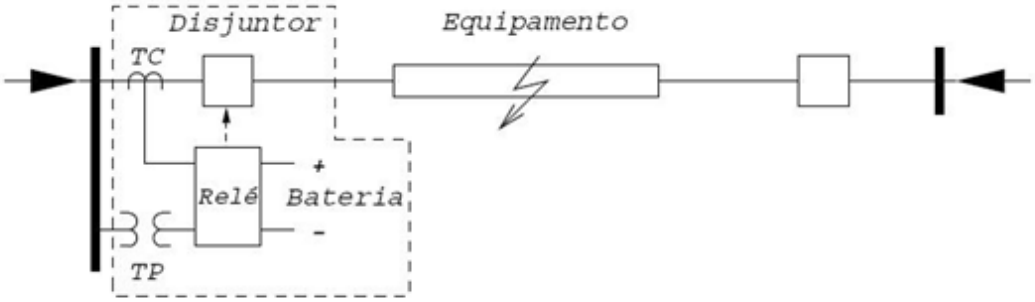
4.7 DISJUNTOR

O disjuntor é um equipamento de alta tensão com capacidade para interromper correntes de curtos-circuitos, isolando a parte sob falta do restante do sistema. Além desses equipamentos o sistema de proteção necessita de uma fonte de corrente contínua, fornecida pela bateria. Deve-se prever uma capacidade em Ah adequada, pois além de alimentar o sistema de proteção ela alimenta também os sistemas de

controle e sinalização e muitas vezes, a iluminação de emergência da subestação ou da usina.

Um diagrama unifilar simplificado, destacando o sistema de proteção, é mostrado na Figura 18.

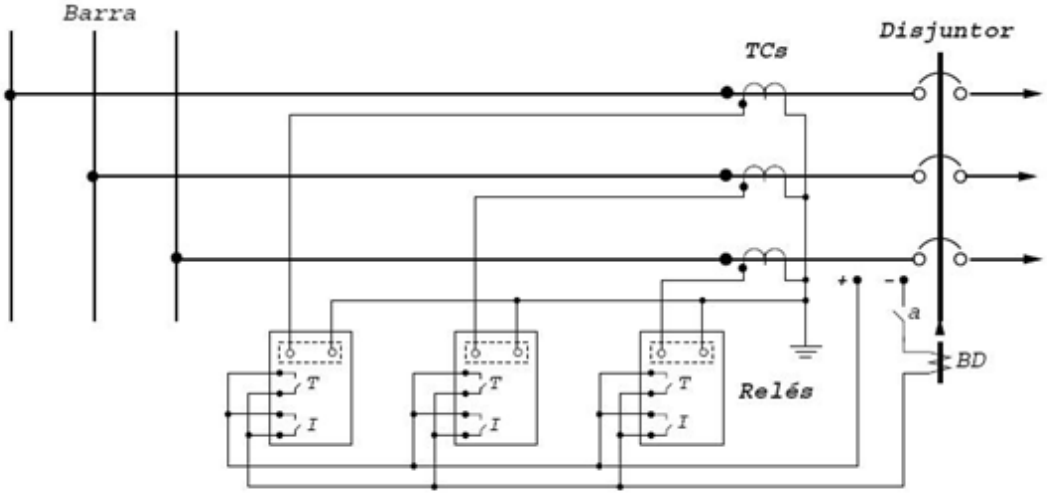
Figura 18 – Diagrama de proteção



Fonte: próprio autor.

A Figura 19 mostra um diagrama trifilar de um sistema de proteção típico. Trata-se de um esquema com três relés de sobrecorrente, com unidades temporizadas (T) e unidades instantâneas (I).

Figura 19 – Diagrama trifilar do sistema de proteção



Fonte: próprio autor.

A seguir, os passos da atuação deste sistema, após a ocorrência de um curto-circuito.

a) Ocorre um curto-circuito.
b) A elevação da corrente no secundário do TC é proporcional ao valor da corrente de curto-circuito.
c) O circuito de corrente do relé sente a elevação da corrente (sobrecorrente).
d) Dependendo do valor da sobrecorrente e dos ajustes no relé, opera a unidade temporizada (T) ou a unidade instantânea (I), fechando o contato.
e) O fechamento de qualquer um dos contatos energiza através da corrente contínua fornecida pela bateria, a bobina de desligamento (BD) do disjuntor.
f) A energização da BD provoca a repulsão do núcleo de ferro, normalmente em repouso e envolto pela bobina.
g) d. O movimento abrupto do núcleo, provocado pela força eletromagnética, destrava o mecanismo do disjuntor, que abre os seus contatos.
h) Deve-se salientar que, qualquer que seja o sistema de proteção, os contatos dos relés são ligados em série com a bobina de desligamento do disjuntor. Além disso, um contato “a" do disjuntor é também introduzido no circuito. A posição deste contato acompanha a posição dos contatos principais do disjuntor, isto é, o contato “a" é aberto quando o disjuntor é aberto e vice-versa. A finalidade deste contato é evitar a queima da BD na eventualidade de o contato do relé ficar colado.(SATO, 2015).

4.8 RELÉ

O relé de proteção é um dispositivo que toma decisões, comparando o valor medido com o valor ajustado previamente, é um dispositivo sensor que comanda a abertura do disjuntor quando surgem, no sistema protegido, condições anormais de funcionamento. Eles devem analisar e avaliar uma variedade grande de parâmetros (corrente, tensão, potência, impedância, ângulo de fase) para estabelecer qual ação corretiva é necessário. Os parâmetros mais adequados para detectar a ocorrência de faltas são as tensões e as correntes nos terminais dos equipamentos protegidos.

O relé deve processar os sinais, determinar a existência de uma anormalidade e então iniciar alguma ação de sinalização (alarme), bloqueio ou abertura de um disjuntor, de modo a isolar o equipamento ou parte do sistema afetada pela falha,

impedindo que a perturbação danifique equipamentos, comprometa a operação do sistema ou propague-se para outros componentes e sistemas não afetados.

O ponto fundamental no sistema de proteção é definir quando uma situação estiver dentro ou fora do padrão. Portanto, o relé deve perceber quando estiver em uma situação anormal e atuar corretamente de acordo com a maneira que lhe for própria. Com intuito de alcançar uma correta seletividade entre dispositivos de proteção, é denominada uma margem de tempo de atuação ou intervalo de seletividade (VIANA FILHO, 2010).

4.8.1 **Relé de sobrecorrente**

O relé de sobrecorrente tem como grandeza de atuação a corrente elétrica do sistema. Isto ocorrerá quando esta atingir um valor igual ou superior a corrente mínima de atuação.

O relé de sobrecorrente avalia as variações de corrente tendo por base uma corrente denominada de pick-up. O valor da corrente medida sendo superior ao valor pré-ajustado, o relé de sobrecorrente será sensibilizado e mandará um sinal de comando de abertura para o disjuntor, isolando assim a parte defeituosa do sistema. Ele detecta níveis altos de corrente causados por falta entre duas ou mais fases ou entre uma ou mais fases e a terra.

O funcionamento da proteção de sobrecorrente é definido pelo nível de curto-circuito, na qual definirá um gráfico de funcionamento a partir da sobreposição de curvas de tempo inverso e curvas de tempo definido (VIANA FILHO, 2010).

4.8.2 **O relé de sobrecorrente direcional de fase**

A unidade de sobrecorrente direcional de fase monitora correntes e tensões no terminal onde se encontra instalada. Pode haver uma unidade de sobrecorrente instantânea, uma unidade temporizada ou ambas.

O que a diferencia das proteções de sobrecorrente do tipo 50 e 51 é que esta busca enviar sinal de abertura ao disjuntor apenas para faltas que se encontrem adiante do relé. Caso uma falta esteja localizada atrás do relé, por mais severa que seja a corrente, a unidade 67 ficará bloqueada e não irá atuar (GONZALEZ, 2007).

4.8.3 Função 50/51 e 50n/51n (proteção de sobrecorrente instantânea e temporizada de fase e neutro)

Os relés de sobrecorrente são compostos por duas unidades: instantâneas e temporizadas, nos equipamentos elétricos estas recebem os números 50 e 51, respectivamente. A unidade 50 atua instantaneamente ou segundo um tempo previamente definida. As unidades instantâneas trabalham com dois ajustes: corrente mínima de atuação e tempo de atuação. A unidade 51 pode atuar com curvas de tempo dependentes ou de tempo definido. As unidades de tempo dependentes permitem dois tipos de ajustes: corrente mínima de atuação e curva de atuação.

4.8.4 Noções de coordenação de relés de sobrecorrente

Um sistema elétrico deve ser equipado com diversos dispositivos de proteção, estrategicamente situados, destinados a protegê-lo efetivamente e seguramente contra todos os curtos-circuitos e outras condições anormais que afetem a sua operação.

É primordial que o local atingido pela anormalidade seja isolado, automaticamente, do restante do sistema de uma maneira que afete menos possível a integridade dos componentes elétricos e o fornecimento da energia elétrica. Para atingir a contento esta missão, deve-se prover o sistema de proteção de uma característica muito importante denominada seletividade. Isso significa que, apesar de cada dispositivo de proteção atuar de forma autônoma, as suas características devem guardar entre si uma determinada relação.

Esta tarefa, que depende da atuação humana, é denominada coordenação. Assim, para que os dispositivos de proteção sejam seletivos é necessário que eles estejam coordenados.

Em suma, uma boa coordenação visa dois aspectos:

a) Isolar a parte faltosa tão próximo quanto possível da sua origem e;
b) Isolar a parte faltosa tão rápido quanto possível.

Para se conseguir uma boa coordenação é necessário conhecer as condições normais de operação e os níveis das correntes de curtos-circuitos, além das características dos componentes do sistema e dos dispositivos de proteção.

5 ESTUDO DE CASO

A particularidade da exposição ao tempo, intempéries ou desastres naturais, faz com que a ligação da UFV com a subestação por meio de linha de distribuição seja objetivo dessa monografia. As informações apresentadas na tabela 14 são componentes da solicitação inicial da relação de equipamentos instalados que compõe a usina, e como objetivo final a tabela 14 exprime os dados de cada ponto da proteção e seus respectivos ajustes para operar em uma eventual falha.

A demanda contratada da usina é apresentada na tabela 5. Um conjunto de quatro transformadores com potência unitária de 1,75 MVA realizam a elevação da tensão de saída dos inversores (~ 600V em corrente alternada) para a tensão de conexão de 13,8 kV. Nas etapas 1 a 8, o ajuste para conexão e temporização do dispositivo de proteção, assim como o memorial de cálculo, foram apresentados para apreciação da concessionária local para aprovação e posterior energização.

As informações e detalhes técnicos da UFV estão nos apêndices G, H e I.

5.1 FILOSOFIA DE PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

Durante uma condição de falta, o sistema de proteção deverá selecionar e enviar sinal de disparo aos disjuntores mais próximos à mesma. Esta propriedade também é chamada de ‘discriminação’ e é alcançada por meio de dois métodos gerais:

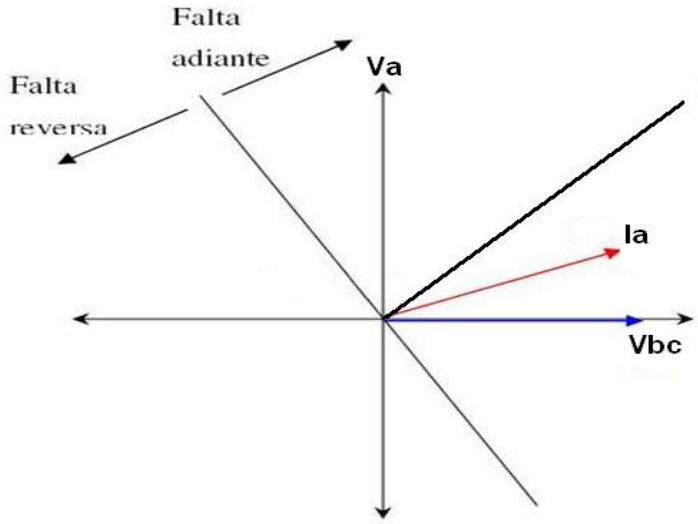
Relés são dispostos em sucessivas zonas de modo a operar em tempos graduados considerando a sequência dos equipamentos, ou seja, embora um certo número de relés seja sensibilizado, somente aqueles relevantes à zona de falta devem completar suas funções (disparo - *trip*). Os outros realizam operações incompletas e retornam ao estado normal.

É possível projetar relés que respondam especificamente a faltas contidas dentro de uma zona pré-definida. Estas unidades podem ser aplicadas em toda a extensão do sistema, podendo apresentar tempo de atuação bastante rápido, pois não envolvem graduações de tempo (UFSC, 201-?).

5.2 ÂNGULO DE TORQUE RELÉ DIRECIONAL

O ângulo de torque é sempre tomado em relação à tensão de polarização (referência) e que a linha de conjugado nulo fica a 90° desta linha (UFSC, 201-?).

Figura 20 – Ângulo de máximo torque de um relé direcional



Fonte: Gonzalez (2007).

5.3 AJUSTES PARA PARAMETRIZAÇÃO DOS RELÉS

Para ajustar e parametrizar os reles, devemos ter; pelas simulações, o valor da corrente de *pick-up* (valor de corrente que sensibiliza o equipamento de proteção), o Dial (define o tempo de atuação do equipamento de proteção) e o *pick-up* instantâneo (valor de corrente que faz com que o equipamento de proteção atue instantaneamente).

As curvas devem atender um tempo máximo de abertura e buscar um tempo mínimo para seletividade de proteções, soma-se com o tempo de abertura interno do disjuntor a atuação do rele e mais uma margem de erro de segurança, também devemos considerar que este tempo não pode ser muito baixo para não invadir a baixa tensão dos transformadores seguintes.

Os relés de sobrecorrente de fase devem atuar para curtos-circuitos trifásico e bifásico e o relé de terra deve atuar para curto-circuito monofásico (ou fase-terra). Eles

possuem dois elementos (ou unidades): o elemento temporizado e o elemento instantâneo.

As normas ANSI e IEC são utilizadas e referenciadas nos estudos de proteção e de curtos-circuitos em sistemas trifásicos de corrente alternada. Sendo muito utilizadas em escala industrial para os equipamentos fabricados no exterior e instalados no Brasil, a ANSI como padrão americano e a IEC europeiaformaram a base das normas técnicasda ABNT. Assim, estas normas também foram consultadas e utilizadas no desenvolvimento deste projeto, que teve auxílio do software do fabricante do dispositivo de proteção utilizado para o ajuste dos parâmetros de proteção que melhor atendesse a condição deste estudo de caso.

A Tabela 2 mostra os relés de sobrecorrente e os seus respectivos elementos e as nomenclaturas.

Tabela 2 – Nomenclaturas dos relés de sobrecorrente

Relé	**Elemento**	**Nomenclatura**
Fase	Temporizado	51 / 67 TOC
Fase	Instantâneo	50 / 67
Terra	Temporizado	51N ou 51 GS / 67N TOC
Terra	Instantâneo	50 N

Fonte: Norma ANSI.

As nomenclaturas são números padrões que identificam os relés por função.

O relé de terra denominado 51 GS (*Ground Sensor*) é ligado em série com o relé 50-51N. Este relé pode ser ajustado para um valor de pick-up muito baixo, o que permite que ele atue para curto-circuito monofásico com alta resistência.

Os elementos temporizados possuem basicamente dois ajustes: o tape e o dial de tempo. O tape é ajustado em função da corrente e o dial de tempo é selecionado de acordo com as temporizações requeridas para a coordenação.

O valor do tape determina a corrente mínima capaz de iniciar a operação do relé, a chamada corrente de pick-up.

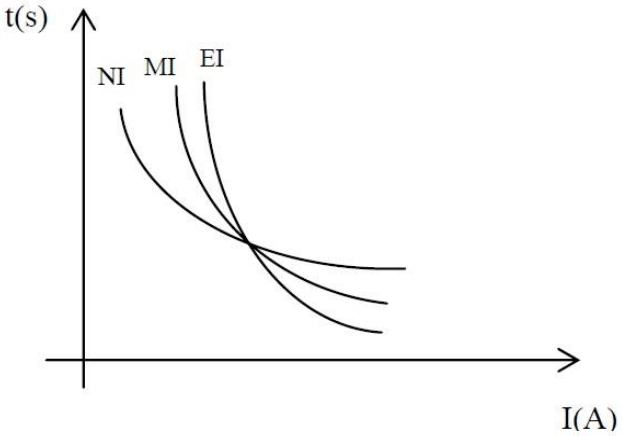
As características de resposta dos relés de sobrecorrente são alocadas num gráfico em função de múltiplo da corrente de tape versus tempo (segundos), para cada ajuste dial de tempo. Há, pois, uma família de curvas, cujas declividades mais usuais são denominadas.

5.4 GRÁFICO TEMPO/CORRENTE DE OPERAÇÃO DO RELÉ

Basicamente os relés de sobrecorrente são construídos com três tipos de curvas, a de tempo normalmente inverso, muito inverso e extremamente inverso.

- NI – Normalmente Inversa: É a família de curvas mais comum, onde o tempo de operação é inversamente proporcional ao valor de atuação.
- MI – Muito Inversa: As características dessas curvas são mais acentuadas que as curvas NI.
- EI – Extremamente Inversa: São as curvas mais acentuadas entre todas as curvas.

Figura 21 – Curvas características normalmente inversa (NI), muito inverta (MI) e extremamente inversa (EI)



Fonte: Almeida(2000).

Nos relés eletromecânicos as características são fixas, portanto, se num determinado sistema, os relés de sobrecorrente utilizados tiverem uma característica muito inversa e necessitar mudar para uma característica normal inversa a única solução é a substituição dos relés. Isto não acontece com os relés de estado sólido e digital, pois, um único relé engloba todas as características, que podem ser selecionadas conforme a necessidade.

As curvas características dos relés de estado sólido e digital sãomodeladas através da Equação33.

$$t = \frac{k.DT}{\left(\frac{I}{I_S}\right)^{\alpha} - 1} \text{(Eq.33)}$$

Nesta Equação DT é o Dial de Tempo, I é corrente secundária que passa pelo relé, Is o tape ajustado e k e α são constantes que dependem de cada tipo de característica.

A relação ($\frac{I}{Is}$) é denominada múltiplo do valor do tape.

A tabela 3 fornece as constantes que irão definir os grupos (NI, MI ou EI). Segundo a classificação de curvas mediante verificação da norma IEC 60255-3 (ABB, 2004), o fator k influencia no posicionamento da curva em relação ao tempo e um k menos implica em um tempo de operação mais rápido.

Tabela 3 – Constantes dos relés de estado sólido e digital

	Normal Inverso	**Muito Inverso**	**Extremamente Inverso**
k	0,1	13,5	80,0
α	0,02	1,0	2,0

Fonte: Norma IEC

6 RESULTADOS

A solicitação da construção da linha de distribuição para a conexão da UFV vem direto da concessionária de energia via consulta de acesso para a conexão, e posteriormente à entrega da documentação outro documento mais robusto com toda a orientação técnica, o parecer de acesso, que contempla de uma opção de cabeamento e distância do local da UFV até a subestação mais próxima, deve ser considerado o nível atual de carregamento dos *bays* da subestação, e atualmente pode ser exigida e orientada a separação da potência das redes limitada à situação do *bay*.

A rede orientativa da concessionária indicava um cabeamento 336Caa de alumínio nu com alma de aço, porém o cabeamento de rede protegida de 150mm² foi o escolhido após o questionamento da rede a ser construída ser particular e independente, além da alteração do trajeto a ser percorrido diminuindo a distância total da referida rede de distribuição do parecer inicial de 12 km para 9,5 km.

Além do DEER (área de travessia de rede na rodovia federal BR135), também foram ressarcidos os proprietários das áreas de servidão da rede nos locais em que a rede percorria as áreas particulares.

Os valores foram definidos considerando o afastamento da servidão de 15 metros de largura ao longo de todo o percurso da rede, gerando um valor de indenização para o proprietário local e a outros dois proprietários rurais: um deles com 8 postes e o outro com 4 postes após a entrada na área urbana. Um último caso foi uma área de loteamento tratado apenas com um proprietário, corrigindo áreas comcercas e alocando a cabine de medição, seguindo as exigências da norma da concessionária local que determina afastamento menor que100 metros da subestação. Por fim, as localidades em que haviam reserva protegida foram aprovados pelos órgãos competentes,ICMBio e IEF,validando e autorizando o avanço na construção da rede.

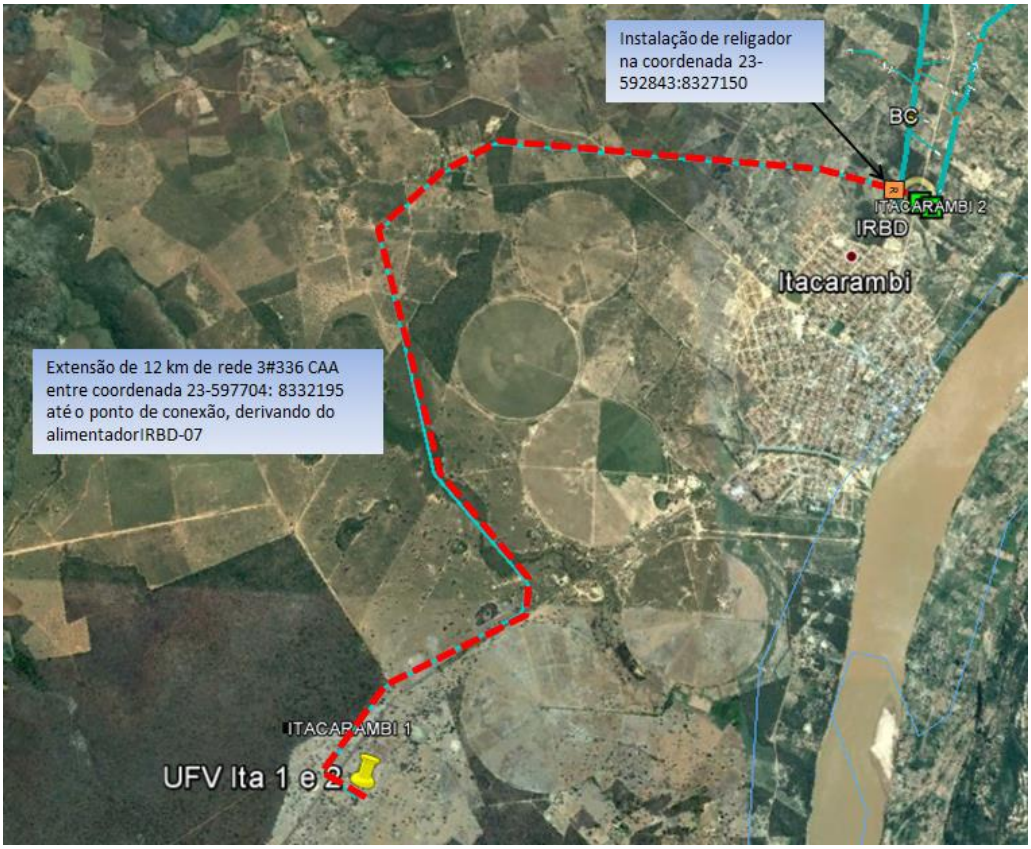
Também foram exigidos no parecer: a construção completa da cabine de medição, um retrofit do *bay* da subestação da concessionária. O fato é que cada um dos *bays* pode receber até 7MW com alimentador dedicado para a entrada da UFV nesse estudo, que tem apenas o acesso a dados de medidores de energia, sem o

controle da UFV por parte da concessionária ou CCEE, ficando a operação da UFV sobo controle do cliente.

Além do relé de proteção, foram instalados dois religadores pelo trajeto da rede, um deles fica dentro da subestação e substituído por um mais atual e com as proteções necessárias. Um segundo religadorcom a função de proteção da rede em específico, cuja atuação tem por finalidade evitar qualquer complicação do curto circuito atingir a subestação da concessionária, oferecendo um total controle no caso da ocorrência de uma falta. A redundância de proteção porreligador de dentro da subestação garante que em caso do primeiro religador não atuar por algum motivo, o segundo fará a sua função, protegendo o sistema de qualquer falha ou defeito dentro da subestação.

A necessidade da construção da rede de distribuição surgiu de uma orientação da concessionária local, considerando a dimensão da rede elétrica a ser construída, os locais do religador e da cabine de medição, determinando o alimentador da subestação que receberia a conexão de GD, conforme apresentado na Figura 22:

Figura 22 – Localização Georreferenciada da UFV ITA I e ITA II até a subestação de conexão



Fonte: Google *Maps*.

6.1 MEMÓRIA DE CÁLCULOS E PARÂMETROS PARA AJUSTES DA PROTEÇÃO ELETRÔNICA UFV 13,8KV – URP 6000 – DEMANDA 6630KW

As informações apresentadas foram compiladas em software para análise com *inputs* dos dados básicos do sistema, gerando os ajustes das curvas aplicadas para o relé, conforme a Tabela 4, onde é mostrada a corrente nominal de cada transformador elevador, assim como suas tensões de primário e secundário.

Tabela 4 – Memória de cálculo

Trafo nº 1	13,8	-	0,44	kV	1750	KVA	In	= 73,30	A
Trafo nº 2	13,8	-	0,44	kV	1750	KVA	In	= 73,30	A
Trafo nº 3	13,8	-	0,44	kV	1750	KVA	In	= 73,30	A
Trafo nº 4	13,8	-	0,44	kV	1750	KVA	In	= 73,30	A

Demanda contratada (D) 6625KW

Fonte: próprio autor.

A Tabela 5 apresenta a condição nominal da corrente total da instalação, aplicando o fator de potência solicitado para essa conexão, e logo após a etapa de corrente de partida do dispositivo de proteção.

Tabela 5 – Etapa 1: cálculo das correntes nominais (In)

$$In = \frac{D}{1{,}73 \times V \times Fp\ (médio)} \qquad In = 301{,}63\ A$$

D	6625 KW
V	13,8 KV
Fp	0,92

Corrente de partida do relé

Ip F	=	1,05 x In	Ip	=	316,71	A	Fase
Ip N	=	In (fase) * 1/3	IpN	=	105,57	A	Neutro

Fonte: próprio autor.

A Tabela 6 apresenta as condições máximas permitidas de curto-circuito no ponto de conexão. Mostra ainda as características do transformador de corrente aplicado.

Tabela 6 – Etapa 2: Corrente de curto-circuito máxima (ICC fornecida pela concessionária)

Icc Trifásico			=	3342	A		
Icc Fase/Fase			=	2919	A	*Dados GEMINI CEMIG*	
Icc Fase/Terra			=	3643	A		
Transformador de corrente							
(Icctrif. / 50)	66,84	**TC**	=	350 : 5	**RTC**	=	70
					FT	=	1,2

Fonte: próprio autor.

A Tabela 7 leva em consideração a corrente de magnetização dos transformadores e também a impedância em percentual, para a parametrização ideal do relé.

Tabela 7 – Etapa 3: corrente de magnetização dos transformadores (Im)

	P (KVA)	**Z (%)**	**I nominal (A)**	**I magnet (A)**
Trafo 1	1750	6	73,30	586,41
Trafo 2	1750	6	73,30	586,41
Trafo 3	1750	6	73,30	586,41
Trafo 4	1750	6	73,30	586,41
Total	7000			

Corrente de magnetização total da instalação (Inrush)

Im	=	8x In (Trafo maior) + In (Trafo 2) + In (Trafo 3) + In (Trafo 4)		
Im	=	8,0x 73,30 +73,30+73,30+73,30		
Im	=	806,32	A	*Com um tempo de duração = 0,1 s*

Fonte: próprio autor.

O Apêndice E detalha a formação final da linha de distribuição desde o primeiro poste até a ligação na cabine de medição, que fica próxima a subestação.

A Tabela 8 descreve a quarta etapa para definição dos pontos ANSI dos transformadores, definindo a temporização de atuação para o caso de extrapolar o valor de corrente definido.

Tabela 8 – Etapa 4: cálculo do ponto ANSI dos transformadores

I ansi	=	(100/ Z%)	X	In				
In ansi	=	(0,58 x 100 / Z%)	X	In				
Trafo 1	=	1750 KVA	Trafo 2	=	1750 KVA	Trafo 3	=	1750
I ansi	=	1221,69 A	I ansi	=	1221,69 A	In ansi	=	1221,69
In ansi	=	708,58 A	In ansi	=	708,58 A	In ans	=	708,58
por	4 s		por	4 s		por	4 s	
Trafo 4		1750 KVA						
I ansi	=	1221,69 A						
In ansi	=	708,58 A						
por	4 s							

Fonte: próprio autor.

A Tabela 9 apresenta a quinta etapa dos cálculos, em que foram definidas as correntes de *startup* para a função de proteção contra as sobrecorrentes de neutro e de fase.

Tabela 9 – Etapa 5: Funções 50 e 50N

Função 50 (Sobrecorrente instantânea da fase)			
Im	=	806,32 A	
Inst	=	845,00 A	(valor um pouco maior que Im, mas inferior a 5%)
Função 50N (sobre corrente instantânea de neutro)			
InstN = Inst/3		InstN =	281,67 A

Fonte: próprio autor.

A etapa 6 descrita pela Tabela 10, define o dial de tempo para atuação do dispositivo de proteção.

Tabela 10 – Etapa 6: Escolha dial de tempo

dt	=	0,097	FASE
dt	=	0,097	NEUTRO

Fonte: próprio autor.

A Tabela 11, sendo a sétima etapa de cálculos, demonstra a escolha da curva ideal em relaçãoàs simulações efetuadas.

Tabela 11 – Etapa 7: Função 51 (sobrecorrente temporizada de fase) Curva EI

t	=	$\frac{K \times dt}{(M^{a} - \beta)} + \delta \times dt$		t1	=	1,27	s	I1	=	845	A
				t2	=	1,53	s	I2	=	780	A
κ	=	80		t3	=	2,07	s	I3	=	690	A
Dt	=	0,097		t4	=	3,00	s	I4	=	600	A
Ip	=	316,71 A	$M = \frac{I\ ent.}{Ip}$	t5	=	4,07	s	I5	=	540	A
α	=	2		t6	=	7,62	s	I6	=	450	A
δ	=	0		t7	=	26,57	s	I7	=	360	A
β	=	1		t8	=	950,86	s	I8	=	318,00	A

Fonte: próprio autor.

A Tabela 12,oitava e última etapa da planilha de cálculos, define os tempos de atuação e consequentemente a curva final para parametrização.

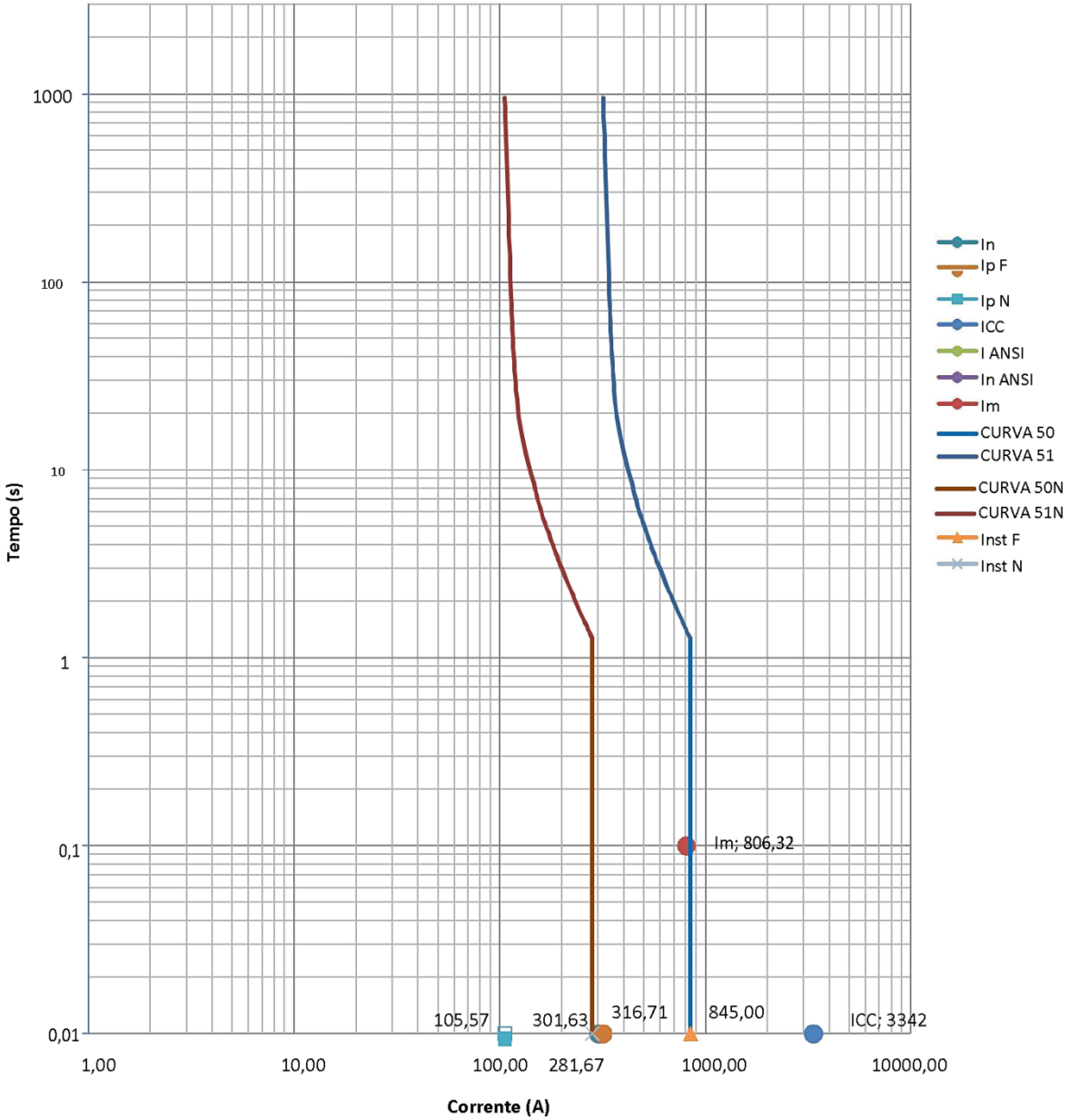
Tabela 12 – Etapa 8: Função 51N (sobrecorrente temporizada de Neutro) Curva EI

t	=	K x dt / (Mª – β) + δ x dt		t1	=	1,27	s	I1	=	282	A
				t2	=	1,53	s	I2	=	260	A
κ	=	80		t3	=	2,07	s	I3	=	230	A
Dt	=	0,097		t4	=	3,00	s	I4	=	200	A
Ip	=	105,57	M = I ent. / Ip	t5	=	4,07	s	I5	=	180	A
α	=	2 A		t6	=	7,62	s	I6	=	150	A
δ	=	0		t7	=	26,57	s	I7	=	120	A
β	=	1		t8	=	950,86	s	I8	=	106,00	A

Fonte: próprio autor.

O coordenograma é apresentado na Figura 23 com as curvas de operação programadas no dispositivo de proteção.

Figura 23 – COORDENOGRAMA Curvas de proteção relé



Fonte: próprio autor

Após a simulação no software e análise de coordenograma para inserção no dispositivo de proteção, segue resultado no quadro de dados de parametrização conforme a Tabela 13.

Tabela 13 – Quadro de plotagem no coordenograma

Ponto	I (A)	T (S)	Descrição
1	301,63	Indef.	Corrente Nominal da Instalação
2	316,71	Indef.	Corrente de partida de Fase do Relé
3	105,57	Indef.	Corrente de partida de Neutro do Relé
4	3342,00	0,00	Corrente Máxima de Curto-Circuito
5	1221,69	4,00	Ponto ANSI fase-fase – 1 a 4 de 1750kVA
6	708,58	4,00	Ponto ANSI fase-terra – 1 a 4 de 1750kVA
7	806,32	0,10	Corrente de magnetização da Instalação
8	845,00	0,00	Ajuste da Unidade Instantânea de Fase
9	281,67	0,00	Ajuste da Unidade Instantânea de Neutro

Subsequência (81U)
58,5 hertz – 10 segundos
57,5 hertz – 5 segundos
56,5 hertz – instantâneo**

Sobrefrequência (81O)
62 hertz – 30 segundos
63,5 hertz – 10 segundos
66 hertz – instantâneo**

Tabela 14 – Quadro de plotagem no coordenograma (conclusão)

Subtensão (27)
80% de Vn (3F) – 5 segundos – “11040V – 10s”
70% de Vn (3F) – 1,5 segundos – “9660V – 5s”
Sobretensão (59)
110% de Vn (3F) – 5 segundos – “15180V – 5s”
120% de Vn (3F) – 0,5 segundos – “16560V – 0,5s”

Fonte: próprio autor.

Importante destacar, a respeito da Tabela 13, que para ocorrer a partida da unidade de frequência, a frequência da entrada deve ultrapassar os limites de subfrequência, sobrefrequência ou derivadas programadas no relé. Se a frequência continuar fora dos limites por um tempo maior que o programado, a saída configurada na matriz fecha após tempo independente.

Os pontos resultantes dos cálculos e simulações apresentadas, geraram resultados satisfatórios para aprovação da ligação da UFV, mas acima de tudo, durante todo o trajeto da linha de distribuição, em qualquer um dos 9,5 km de rede temos a garantia da segurança e manutenção de um sistema seletivo e coordenado para esse caso assim como evitar riscos de origem elétrica, *blackout* ou o desligamento indevido de qualquer alimentador da subestação existente. Maiores detalhes da localização e de todo o projeto, estão nos apêndices A a I, que são componentes para aprovação da concessionária local.

A Tabela 14 mostra o memorial com a relação das cargas instaladas da UFV.

Tabela 14 – Relação de Cargas Instaladas

TRAFO 1 - ITA1 - 1750KVA

b	Demanda de Aparelhos Eletrodomésticos e de Aquecimento		POT. UNIT (W)	POT. TOTAL (KW)	Lim	FD (%)	DEMANDA (kVA)
b1	13	Inversor Sungrow SG125HV	125000	1625,00	1	100,0	1625,00
	TOTAL			**1625,00**			**1625,00**
	D = DEMANDA TOTAL = a +d + c + d		**1625,00**	KVA			
	DEMANDA GERAÇÃO=		**1625,00**	KW			

TRAFO 2- ITA1 - 1750KVA

b	Demanda de Aparelhos Eletrodomésticos e de Aquecimento		POT. UNIT (W)	POT. TOTAL (KW)	Lim	FD (%)	DEMANDA (kVA)
b1	14	Inversor Sungrow SG125HV	125000	1750,00	1	100,0	1750,00
	TOTAL			**1750,00**			**1750,00**
	D = DEMANDA TOTAL = a +d + c + d		**1750,00**	KVA			
	DEMANDA GERAÇÃO=		**1750,00**	KW			

DEMANDA GERADA - UFV ITA 1 **3375** KW

TRAFO 1 - ITA2 - 1750KVA

b	Demanda de Aparelhos Eletrodomésticos e de Aquecimento		POT. UNIT (W)	POT. TOTAL (KW)	Lim	FD (%)	DEMANDA (kVA)
b1	13	Inversor Sungrow SG125HV	125000	1625,00	1	100,0	1625,00
	TOTAL			**1625,00**			**1625,00**
	D = DEMANDA TOTAL = a +d + c + d		**1625,00**	KVA			
	DEMANDA GERAÇÃO=		**1625,00**	KW			

TRAFO 2 - ITA2 - 1750KVA

b	Demanda de Aparelhos Eletrodomésticos e de Aquecimento		POT. UNIT (W)	POT. TOTAL (KW)	Lim	FD (%)	DEMANDA (kVA)
b1	13	Inversor Sungrow SG125HV	125000	1625,00	1	100,0	1625,00
	TOTAL			**1625,00**			**1625,00**
	D = DEMANDA TOTAL = a +d + c + d		**1625,00**	KVA			
	DEMANDA GERAÇÃO=		**1625,00**	KW			

DEMANDA GERADA - UFV ITA 2 **3250** KW

DEMANDA TOTAL GERADA/CONTRATADA **6625** KW

Fonte: próprio autor.

A composição dos ativos elétricos da UFV formou a base para a simulação da demanda.

7 CONCLUSÃO

Usando conceitos da engenharia de aplicação e estudos de proteção do sistema elétrico, este trabalho enfocou na necessidade prioritária do assunto de proteção do sistema elétrico de potência para o atendimento seguro à crescente disseminação de UFVs em geração distribuída, este estudo de caso teve como base um projeto real de estudo de proteção em uma nova linha de distribuição em 13,8kV que recebeu a conexão de duas UFVs de 4MW em geração distribuída.

Esta linha de distribuição foi conectada a uma subestação elevatória de tensão existente ligada a uma rede de transmissão. Nesta subestação foi parametrizada a proteção conforme normativa e respeitando os limites regulatórios delimitados pelo relé de proteção com a finalidade de preservar a funcionalidade segura da nova linha de distribuição face a inserção de centrais geradoras, e cujas funções, com seus parâmetros, foram tratadas neste trabalho. O relé em questão está parametrizado e temporizado para atuar em frequências anormais, tensões fora de padrão e correntes que caracterizem uma falta.

Usando conceitos básicos do sistema elétrico de potência, mais precisamente os estudos de curto-circuito, e por meio do método de componentes simétricas foi possível compreender seus efeitos simulados em caso de falta. Esta simulação teve o apoio do software do fabricante, para o estudo de parametrização do relé de proteção em questão. Este relé monitora continuamente os parâmetros relativos à qualidade de energia na linha, com base nos valores de tensão e de corrente do sistema provenientes dos respectivos transformadores de corrente (TC) e transformadores de potencial (TP), conectados à rede de distribuição.

Em eventuais distúrbios no sistema envia o comando de abertura do disjuntor em tempo hábil, evitando assim deteriorações ou danos em equipamentos, na linha ou em suas conexões. Com os valores de impedância das linhas (reatância e resistência) parametrizados no software, cálculos de curvas por meio do programa para plotar as curvas de atuação tempo x corrente que são os coordenogramas de fase e neutro do ajuste e o conhecimento do sistema em estudo, foi possível admitir um valor de ajuste compatível com cada caso e garantir uma proteção rápida, porém seletiva.

E ao fim das simulações e cálculos, o sistema foi satisfatoriamente protegido pela função ANSI do rele, atendeu as necessidades do sistema e manteve o seletivo, coordenado e ao mesmo tempo sensível.

A construção e o dimensionamento das linhas atuais de distribuição foram voltados na sua essência às conexões de unidades de consumo de energia, com injeção de potência na rede de distribuição de forma unidirecional e, de certa forma, centralizada.

No entanto, face ao crescimento da geração distribuída estes conceitos deverão ser repensados e adequados com a finalidade de garantir a qualidade da energia elétrica dentro dos limites estabelecidos pela ANEEL, e, por consequência o aspecto de proteção. Estudos deste tipo serão necessários sempre que houver uma necessidade de conexão na linha de novas centrais geradoras em geração distribuída.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Marcos A. Dias.**Notas de Aulas da Disciplina Proteção de SistemasElétricos**. Depto. de Eng. Elétrica/UFRN, Natal/RN 2000.

AULA 17 – REPRESENTAÇÃO DE SISTEMAS TRIFÁSICOS EM VALORES “POR UNIDADE” [Apresentação]. 41 p. 201-?

FREITAS, Victor Silva de et al. Cálculo de Matrizes Impedância e Admitância de Sistemas Elétricos de Potência Utilizando o Software Matlab. In: REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 64., 2012, Guamá. **Anais...** Guamá: UFPA, 2012.

GONZALEZ, Juan IgnacioPatricio Rossi. **Representação de relés de proteção em programas de curto-circuito**. 2007. 150 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica)–Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

KINDERMANN, Geraldo. **Curto Circuito**. 2. ed. [Mod. e Ampl.] Edição do próprio autor: 1997.

_____. **Curto Circuito**. 4. ed. Edição do próprio autor: 2005.

LOPES, Ivan José da Silva.**Circuitos Elétricos Lineares e Não lineares** [Apresentação].Universidade Federal de Minas Gerais Programa de Pós-Graduação em EngenhariaElétrica, 2007.

SANTOS, Vanessa Malaco dos. **Estudo de caso de curto-circuito em um sistema elétrico industrial**. 2009. 131 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrico com ênfase em Sistemas de Energia e Automação)–Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SATO, Fujito. **Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

STEVENSON, William D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. Tradução e revisão técnica Arlindo Rodrigues Mayer. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC. **Filosofia de Proteção de Sistemas de Transmissão** [Apresentação]. Florianópolis, 201-?.

VIANA FILHO, Josemar de Sousa. **Coordenação e seletividade da proteção elétrica do terminal portuário do Pecém com a entrada de carga da correia transportadora**. 2010. 94 p. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica)–Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

ABB. REF610 - Techinal Reference Manual.Finlandia: ABB Oy. 2004 Norma IEC 60255-3

IEEE C37.112-1996 (R2007) **Curvas de Tempo Inverso ANSI (IEEEC37.112**) IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations For Overcurrent Relays.

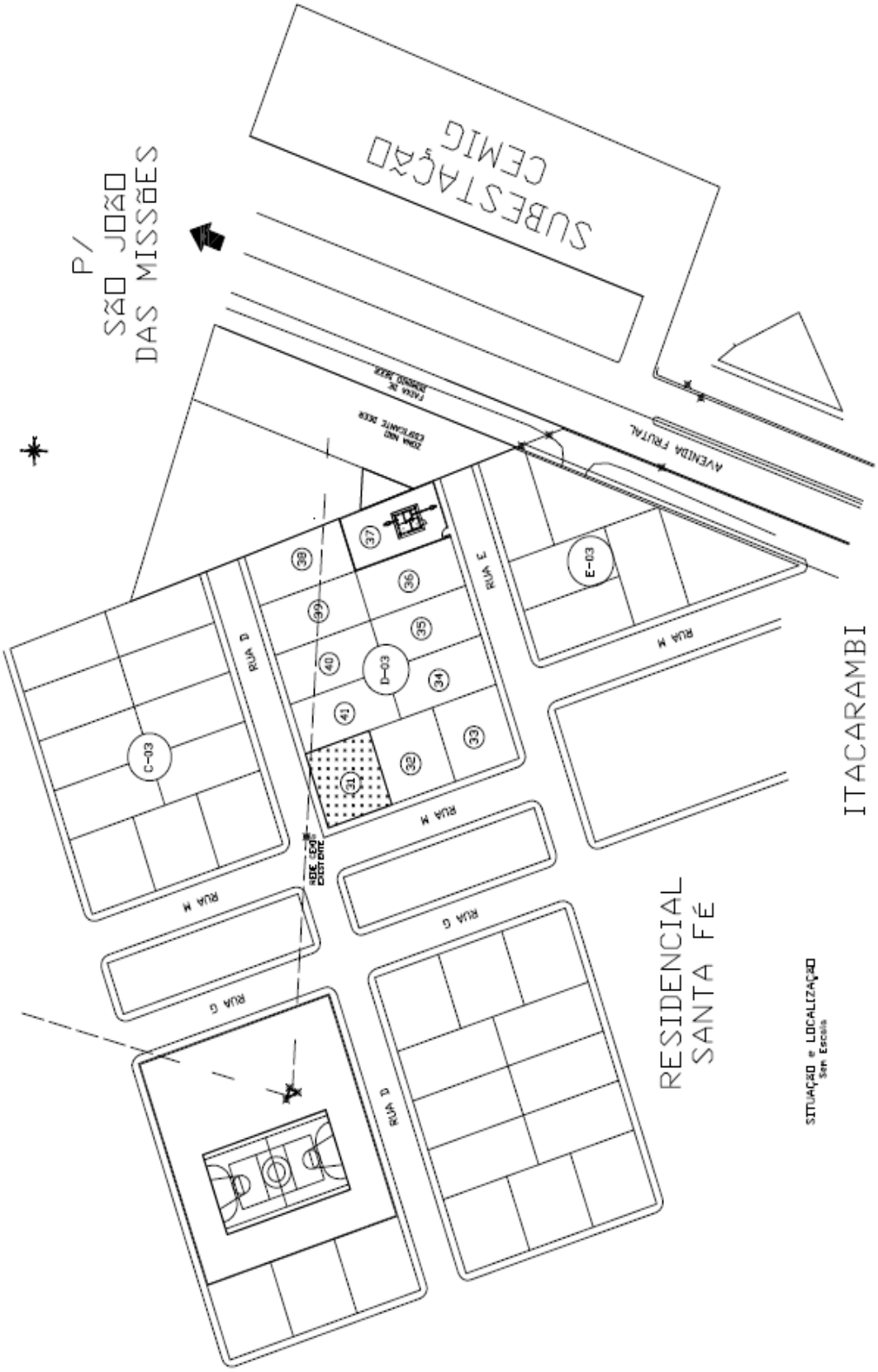
APÊNDICE A – Composição da rede de distribuição UFV ITA sentido Subestação

Subestação detalhe 1

APÊNDICE B – Composição da rede de distribuição UFV ITA sentido Subestação

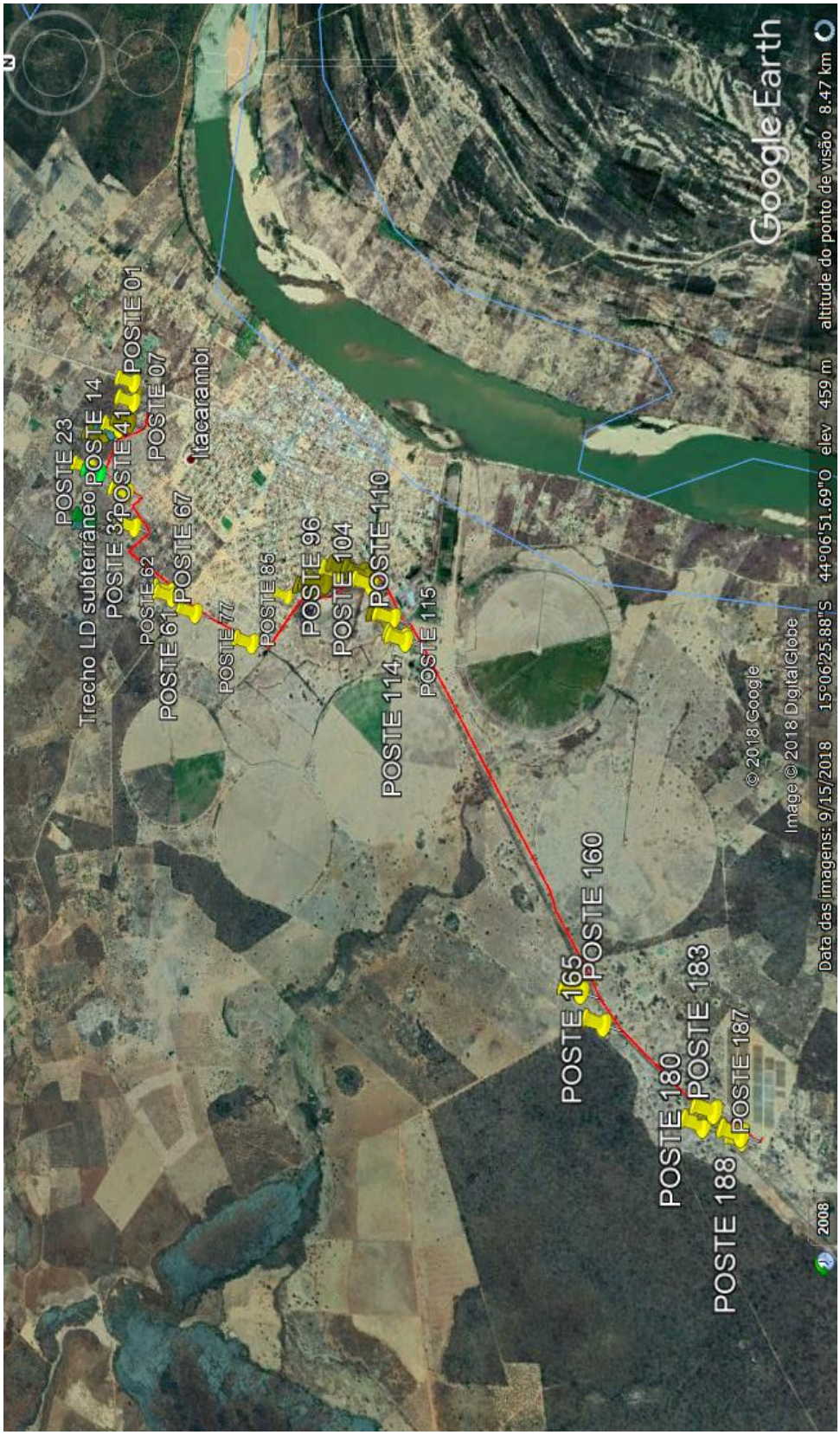
Subestação detalhe 2

APÊNDICE C – Composição da rede de distribuição UFV ITA faixa de servidão



APÊNDICE D – Composição da rede de distribuição UFV ITA sentido Subestação

Detalhe total do projeto de construção final

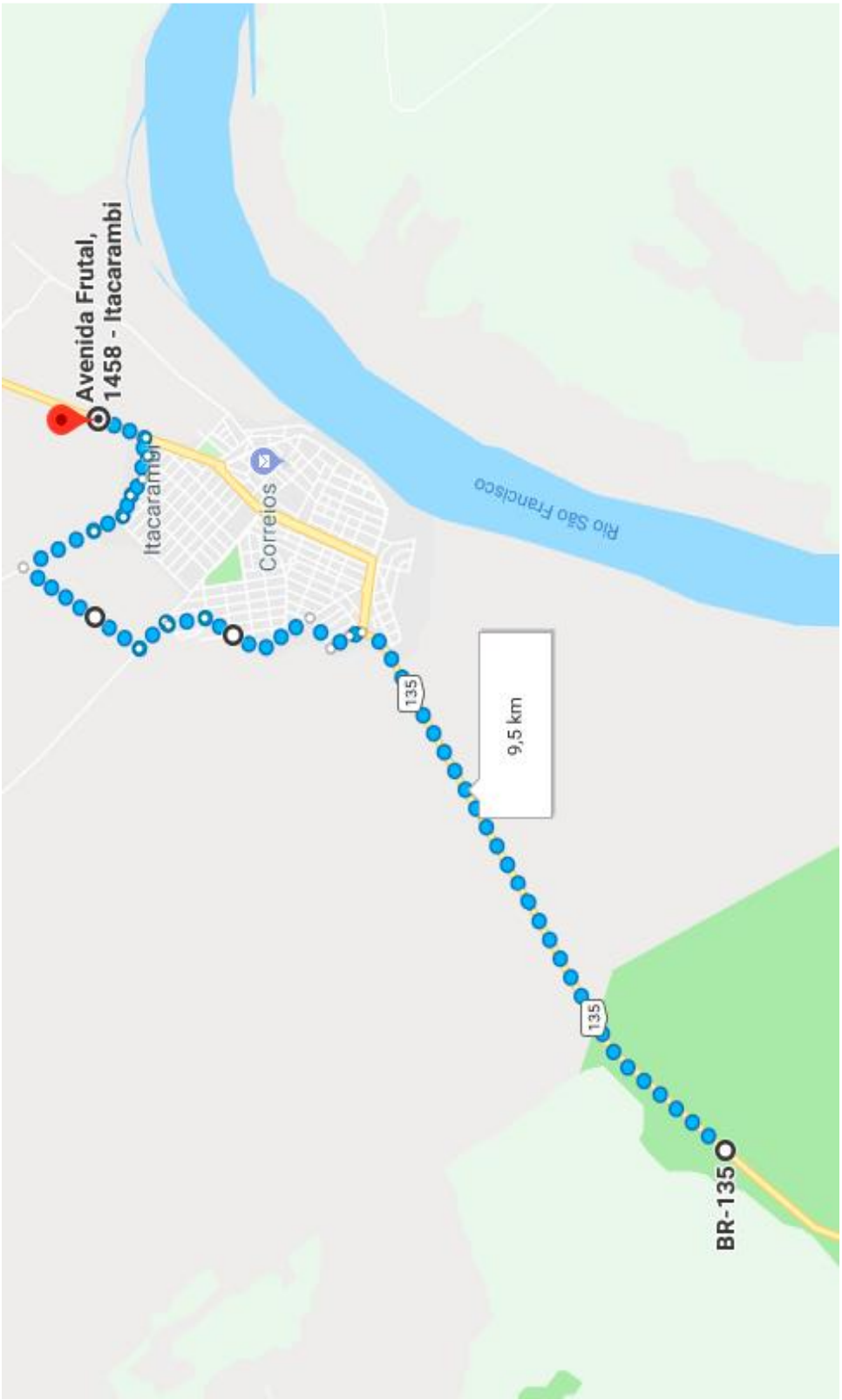


APÊNDICE E – Composição da rede de distribuição UFV ITA sentido Subestação

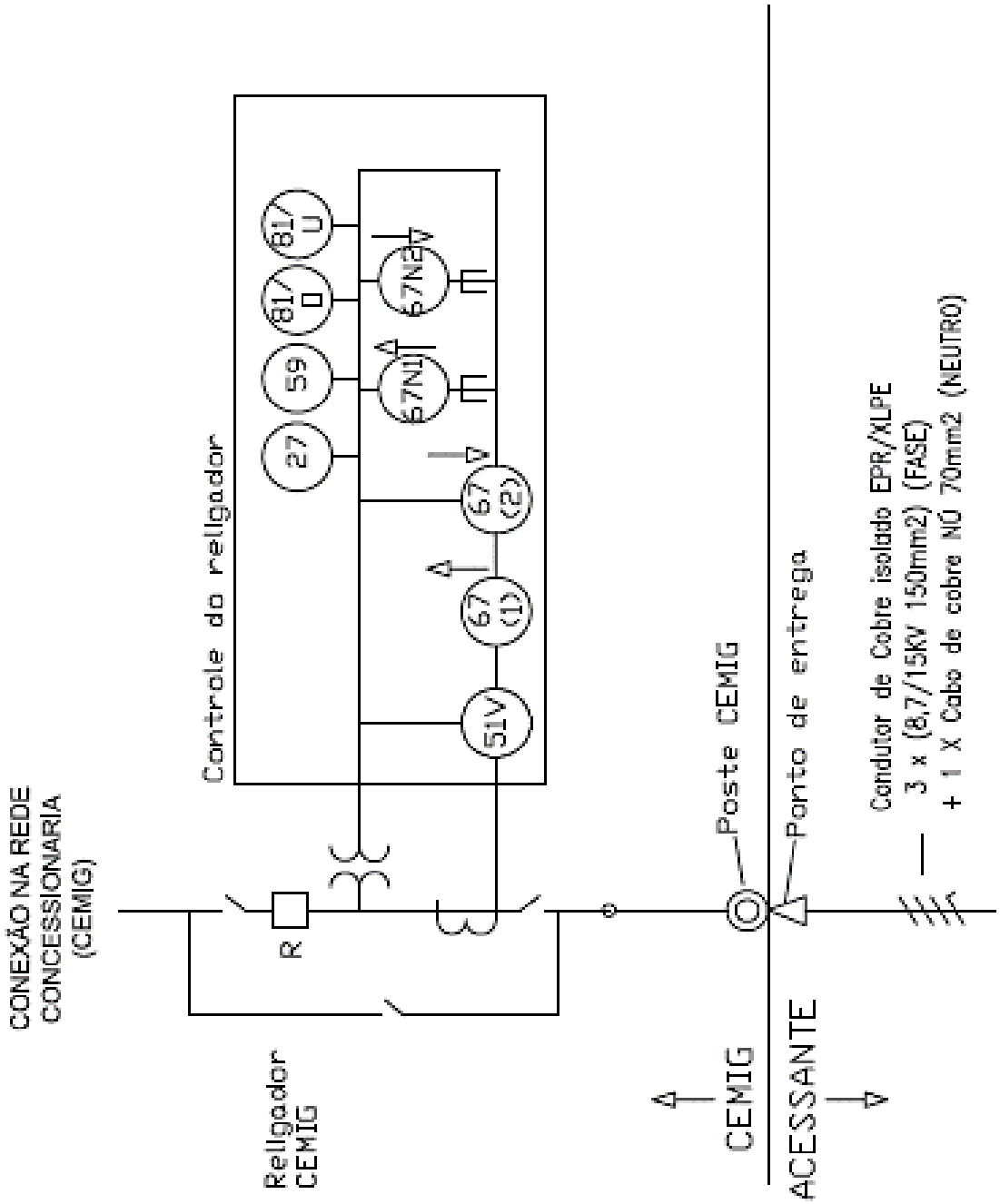
Detalhe total do projeto de construção final

APÊNDICE F – Composição da rede de distribuição UFV ITA sentido Subestação

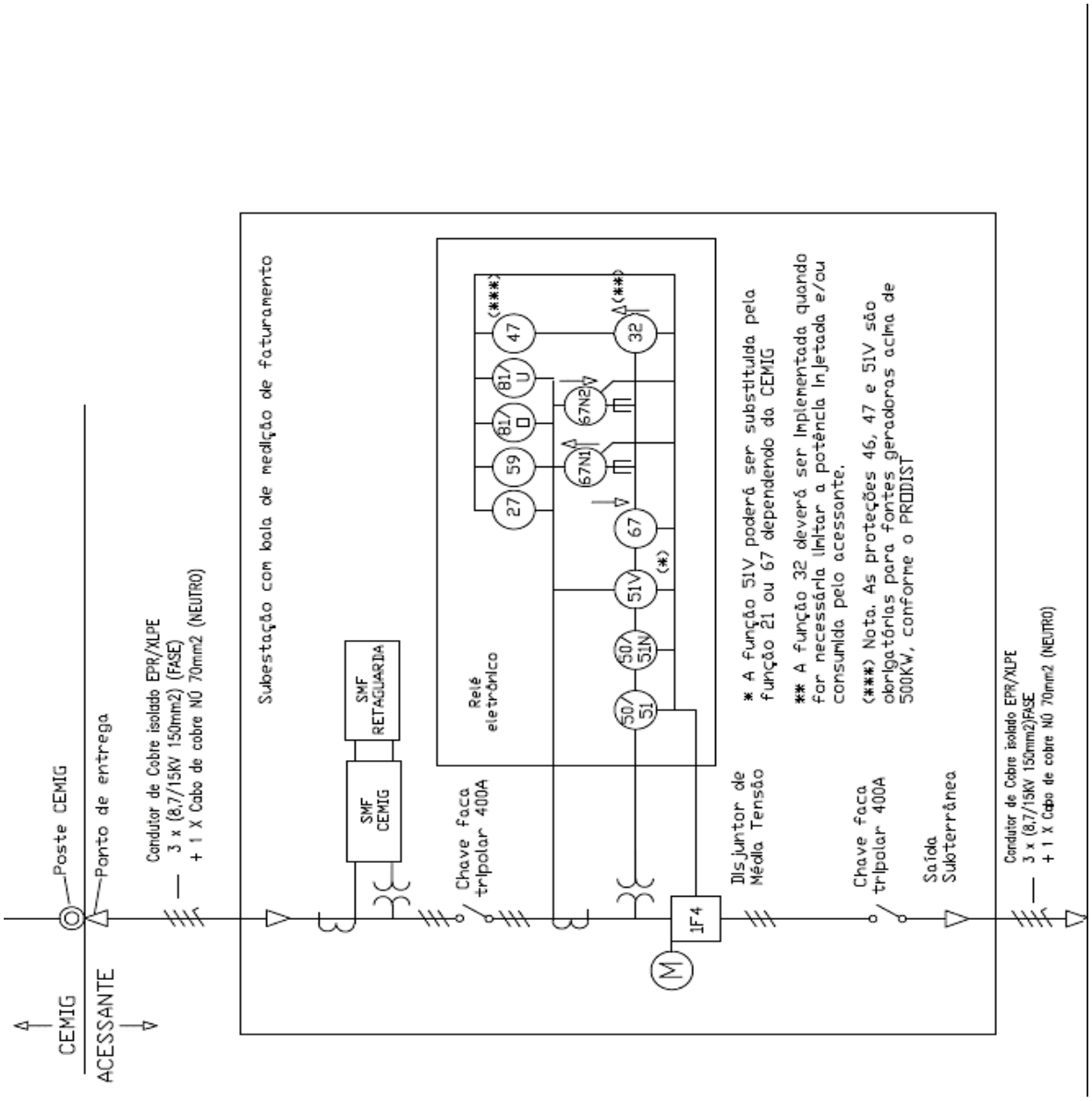
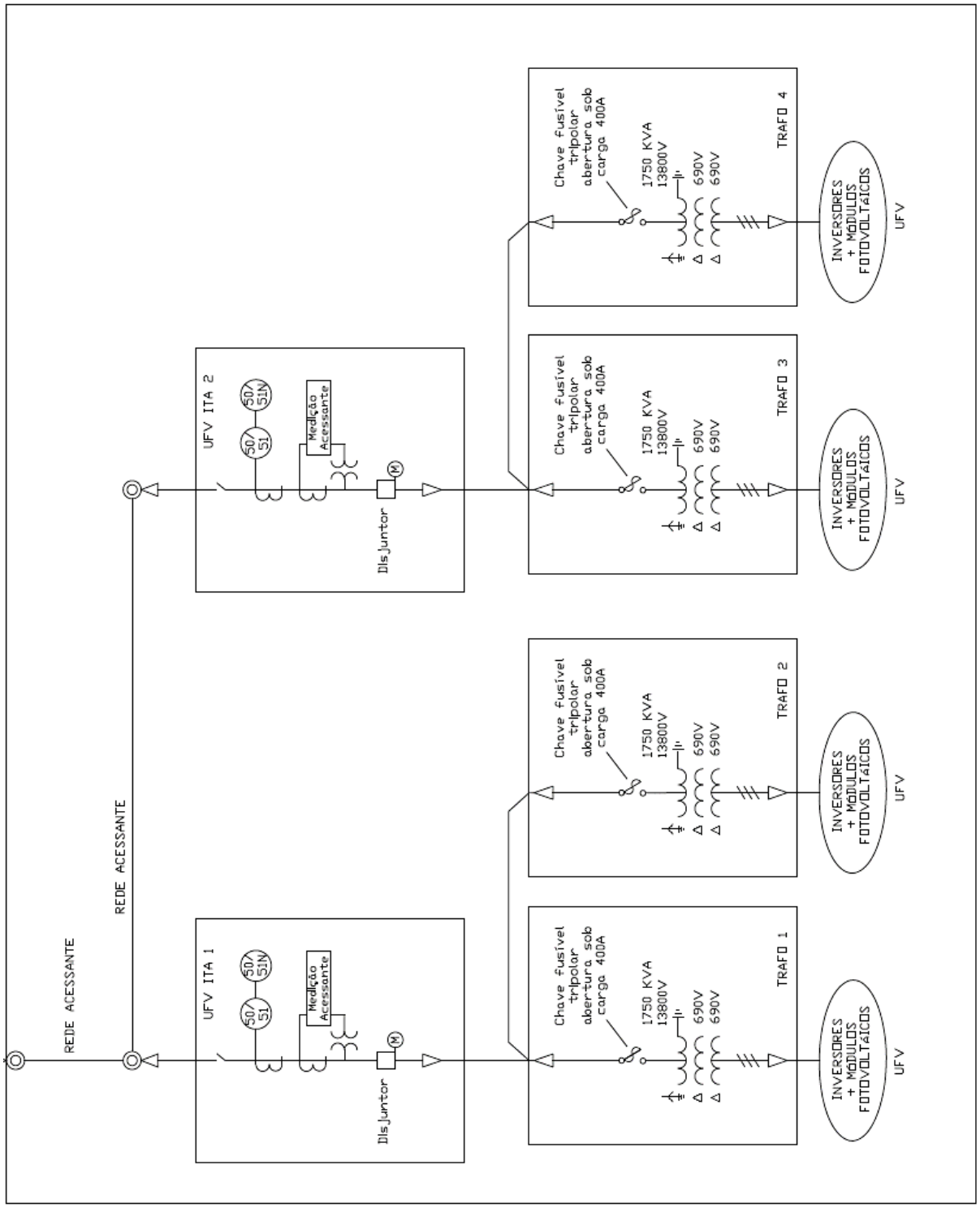
Detalhe dos 9,5 km de distância entre UFV e Subestação de energia



APÊNDICE G – Diagrama Unifilar UFV ITA I e ITA II parte I



APÊNDICE H – Diagrama Unifilar UFV ITA I e ITA II parte II



APÊNDICE I – Diagrama Unifilar UFV ITA I e ITA II parte III